# Advanced Engineering Research

**Т. 21, № 2**

**Теоретический**
**и научно-практический журнал**

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
апрель-июнь 2021 г.

**ISSN 2687-1653**
**DOI: 10.23947/2687-1653**

***Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)***

***Название журнала (до августа 2020): Вестник Донского государственного технического университета***

***Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:***

*01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)*
*01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)*
*01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)*
*01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)*
*05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)*
*05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)*
*05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)*
*05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)*
*05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)*
*05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)*
*05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)*
*05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)*
*05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)*

***Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), а также в международной базе EBSCO***
***Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef***

*Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций*

***Над номером работали:***
И. В. Бойко, Г. И. Рассохин, М. П. Смирнова (англ. версия)

***Адрес учредителя, издателя и редакции:***
344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik-donstu.ru/



# СОДЕРЖАНИЕ

## МЕХАНИКА



## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

# МЕХАНИКА
# MECHANICS





УДК 624.04 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-114-122



## Расчет на устойчивость деревянных арок с учетом нелинейной ползучести

**С. Б. Языев[1], В. И. Андреев[2], А. С. Чепурненко[1]**
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (г. Москва, Российская Федерация)

***Введение.*** В статье рассматриваются вопросы расчета деревянных арок с учетом нелинейной зависимости между напряжениями и мгновенными деформациями, а также ползучести и геометрической нелинейности. В основу положено интегральное уравнение вязкоупругопластической модели наследственного старения, изначально предложенное А. Г. Тамразяном [1] для описания нелинейной ползучести бетона.

***Материалы и методы.*** Мера ползучести принимается в соответствии с работой И. Е. Прокоповича и В. А. Зедгенидзе [2] в виде суммы экспоненциальных функций. Показан переход от интегральной формы закона ползучести к дифференциальной. Связь между напряжениями и мгновенными деформациями для древесины при сжатии определяется формулой Герстнера, при растяжении принимается упругая работа. Решение выполняется при помощи метода конечных элементов в сочетании с методом Ньютона-Рафсона и методом Эйлера по схеме ступенчатого увеличения нагрузки с корректировкой матрицы жесткости с учетом изменения координат узлов с последовательным вычислением дополнительных перемещений узлов, которые обусловлены невязкой сил. Предложенный подход для повышения точности определения деформаций ползучести на каждом шаге допускает вместо метода Эйлера использовать метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

***Результаты исследования.*** На основе вариационного принципа Лагранжа получены выражения для матрицы жесткости и вектора дополнительных фиктивных нагрузок, обусловленных ползучестью. Разработанная авторами методика реализована в виде программы в среде MATLAB. Приведены примеры расчета для шарнирно опертых по концам параболических арок без промежуточного шарнира и с промежуточным шарниром в середине пролета под действием равномерно распределенной нагрузки. Выполнено сравнение результатов, получаемых в вязкоупругопластической и вязкоупругой постановке. Достоверность результатов подтверждена расчетом в упругой постановке в программном комплексе ANSYS.

***Обсуждение и заключения.*** Для рассмотренных арок установлено, что даже при нагрузке, близкой к мгновенной критической, рост перемещений во времени носит ограниченный характер. Таким образом, характер их работы в условиях ползучести сильно отличается от характера деформирования сжатых стержней.

***Ключевые слова:*** ползучесть, деревянная арка, геометрическая нелинейность, вязкоупругопластичность, метод конечных элементов.

***Для цитирования:*** Языев, С. Б. Расчет на устойчивость деревянных арок с учетом нелинейной ползучести / С. Б. Языев, В. И. Андреев, А. С. Чепурненко // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 114–122. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-114-122





## Stability analysis of wooden arches with account for nonlinear creep

**S. B. Yazyev[1], V. I. Andreev[2], A. S. Chepurnenko[1]**
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russian Federation)

***Introduction.*** The paper deals with the calculation of wooden arches taking into account the nonlinear relationship between stresses and instantaneous deformations, as well as creep and geometric nonlinearity, are considered. The analy-

sis is based on the integral equation of the viscoelastoplastic hereditary aging model, originally proposed by A.G. Tamrazyan [1] to describe the nonlinear creep of concrete.
***Materials and Methods***. The creep measure is taken in accordance with the work of I.E. Prokopovich and V.A. Zedgenidze [2] as a sum of exponential functions. The transition from the integral form of the creep law to the differential form is shown. The relationship between stresses and instantaneous deformations for wood under compression is determined from the Gerstner formula, and elastic work is assumed under tension. The solution is carried out using the finite element method in combination with the Newton-Raphson method and the Euler method according to the scheme that involves a stepwise increase in the load with correction of the stiffness matrix taking into account the change in the coordinates of the nodes with the sequential calculation of additional displacements of the nodes, which are due to the residual forces. The proposed approach for increasing the accuracy of determination of creep deformations at each step provides using the fourth-order Runge-Kutta method instead of the Euler method.
***Results.*** Based on the Lagrange variational principle, expressions are obtained for the stiffness matrix and the vector of additional dummy loads due to creep. The method developed by the authors is implemented in the form of a program in the MATLAB environment. Calculation examples are given for parabolic arches simply supported at the ends without an intermediate hinge and with an intermediate hinge in the middle of the span under the action of a uniformly distributed load. The results obtained are compared in the viscoelastic and viscoelastic formulation. The reliability of the results is validated through the calculation in the elastic formulation in the ANSYS software package.
***Discussion and Conclusions.*** For the arches considered, it is found that even with a load close to the instant critical, the growth of time travel is limited. Thus, the nature of their work under creep conditions differs drastically from the nature of the deformation of compressed rods.

***Keywords:*** creep, wooden arch, geometric nonlinearity, viscoelastic plasticity, finite element method.

***For citation:*** S. B. Yazyev, V. I. Andreev, A. S. Chepurnenko. Stability analysis of wooden arches with account for nonlinear creep. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 114–122. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-114-122

**Введение.** Древесина относится к материалам, проявляющим свои нелинейные свойства, как при кратковременных, так и длительных воздействиях. Большинство существующих реологических моделей дерева устанавливает его мгновенные свойства на основе закона Гука, однако для сжатой древесины характерна нелинейная диаграмма упругопластического типа [3]. Впервые вопросы совместного учета мгновенных упругопластических свойств древесины и ее ползучести стал исследовать К. П. Пятикрестовский. Указанные свойства он объединил на основе метода длительного модуля деформации [4–7]. В данном методе уравнение ползучести содержит время в явном виде, что существенно ограничивает его использование в случае сложных режимов нагружения и переменных нагрузок. В литературе имеется значительное количество публикаций по совместному учету ползучести и мгновенной нелинейности деформирования древесины при расчете сжатых стержней [8–14]. В частности, в работе [8] рассматривается вопрос применимости к описанию нелинейной ползучести древесины принципа суперпозиции Больцмана. В работе [9] для сжатых стержней проводится сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными данными, а в статье [10] помимо сжимающей продольной нагрузки учитывается поперечная нагрузка. В работах [11–13] задача устойчивости решается для стержневых элементов в составе рамной конструкции. В статье [14] для сжатых деревянных элементов выводится длительная критическая сила с учетом нелинейной ползучести.

Проблема расчета с учетом ползучести и мгновенной нелинейности деформирования актуальна не только для отдельно взятых стержней и рам, но и для таких стержневых систем, как арки. Целью настоящей работы является разработка методики расчета арочных конструкций с учетом нелинейных свойств материала при кратковременных и длительных воздействиях, а также геометрической нелинейности.

**Материалы и методы.** В качестве соотношения, определяющего связь между напряжениями и деформациями, воспользуемся уравнением вязкоупругопластической модели наследственного старения:

$$\varepsilon(t)=\frac{f\left[\sigma(t)\right]}{E_0(t)}-\int_{\tau_0}^{t} f\left[\sigma(\tau)\right]\frac{\partial C(t,\tau)}{\partial \tau}d\tau, \qquad (1)$$

Данное уравнение впервые было предложено в [1] для моделирования нелинейной ползучести бетона. Функция $f(\sigma)$ здесь устанавливает связь между напряжением и мгновенной деформацией, $C(t,\tau)$ — мера ползучести. Диаграмма напряжения-деформации сжатой древесины при кратковременном нагружении хорошо аппроксимируется формулой Герстнера [15], имеющей вид:

$$\sigma=E_0\varepsilon-\frac{E_0^2}{4R}\varepsilon^2. \qquad (2)$$

Сжимающие напряжения в формулу (2) подставляются со знаком «+». При растяжении для дерева имеет место линейная диаграмма вплоть до разрушения. Выразив из (2) деформацию через напряжение, получим:

$$\varepsilon = \frac{2R}{E_0}\left(1-\sqrt{1-\frac{\sigma}{R}}\right). \quad (3)$$

На основе (3) функцию напряжений $f(\sigma)$ можно записать в виде:

$$f(\sigma) = 2R\left(1-\sqrt{1-\frac{\sigma}{R}}\right). \quad (4)$$

Для меры ползучести древесины воспользуемся формулой, предложенной в работе В. А. Зедгенидзе и И. Е. Прокоповича [2]:

$$C(t,\tau) = \left(C_0 + A_0 e^{-\gamma\tau}\right)\left[1 - B_1 e^{-\gamma_1(t-\tau)}\right], \quad (5)$$

где $C_0 = 2{,}87\cdot10^{-5}$ МПа$^{-1}$, $A_0 = 10{,}95\cdot10^{-5}$ МПа$^{-1}$, $B_1 = 1$, $\gamma = \gamma_1 = 0{,}15$ сут $^{-1}$.

Уравнение (1) можно представить в форме:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon^*, \quad (6)$$

где $E = \dfrac{E_0\sigma}{f(\sigma)}$ — секущий модуль, $\varepsilon^* = -\int_{\tau_0}^{t} f\left[\sigma(\tau)\right]\dfrac{\partial C(t,\tau)}{\partial \tau}d\tau$ — деформация ползучести.

Для меры ползучести в виде (5) деформацию ползучести можно записать в виде суммы двух составляющих:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1^* + \varepsilon_2^*,\ \ \varepsilon_1^* = \gamma C_0 B_1 \int_{\tau_0}^{t} f\left[\sigma(\tau)\right]e^{-\gamma(t-\tau)}d\tau\ ,\ \ \varepsilon_2^* = A_0\gamma\int_{\tau_0}^{t} f\left[\sigma(\tau)\right]e^{-\gamma\tau}d\tau\ . \quad (7)$$

Дифференцируя по времени (7), получим выражения для скоростей роста каждой составляющей:

$$\frac{\partial\varepsilon_1^*}{\partial t} = \gamma\left(C_0 B_1 f\left[\sigma(t)\right] - \varepsilon_1^*\right);\ \ \frac{\partial\varepsilon_2^*}{\partial t} = A_0\gamma f\left[\sigma(t)\right]e^{-\gamma t}. \quad (8)$$

Выведем на основе (6) связь между внутренними усилиями и деформациями для элемента при совместном действии продольной силы и изгибающего момента. Модуль упругости будем предполагать функцией от координаты $y$, которая по высоте сечения меняется от $-h/2$ до $h/2$. На основе гипотезы плоских сечений полную деформацию запишем в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + y\chi, \quad (9)$$

где $\varepsilon_0$ — деформация среднего слоя, $\chi = -\dfrac{d^2v}{dx^2}$ — изменение кривизны.

Подставим далее (9) в (6). Выразив σ через ε, получим:

$$\sigma = E(y)\left(\varepsilon - \varepsilon^*\right) = E(y)\left(\varepsilon_0 + y\chi - \varepsilon^*\right). \quad (10)$$

Продольная сила и изгибающий момент в элементе связаны с напряжением через следующие интегральные зависимости:

$$M = \int_A \sigma y dA\ ;\ N = \int_A \sigma dA\ . \quad (11)$$

Здесь $A$ — площадь поперечного сечения стержня.

Подставим (10) в (11) и преобразуем полученные равенства к матричной форме:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = [D]\begin{Bmatrix} \varepsilon_o \\ \chi \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

где $N^* = \int_A E(y)\varepsilon^*\delta A$, $M^* = \int_A E(y)y\varepsilon^* dA$, $[D] = \begin{bmatrix} EA & ES \\ ES & EI \end{bmatrix}$ — матрица приведенных жесткостей, которые определяются по формулам:

$$EA = \int_A E(y)\,dA,\ ES = \int_A E(y)\,ydA,\ EI = \int_A E(y)\,y^2\,dA\,. \quad (13)$$

Решение задачи с учетом физической и геометрической нелинейности авторами будет выполнено при помощи метода конечных элементов. Используется стержневой элемент, приведенный на рис. 1. Осевая деформация при учете геометрической нелинейности представляет сумму линейной и нелинейной составляющей:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2}\left(\frac{dv}{dx}\right)^2. \tag{14}$$

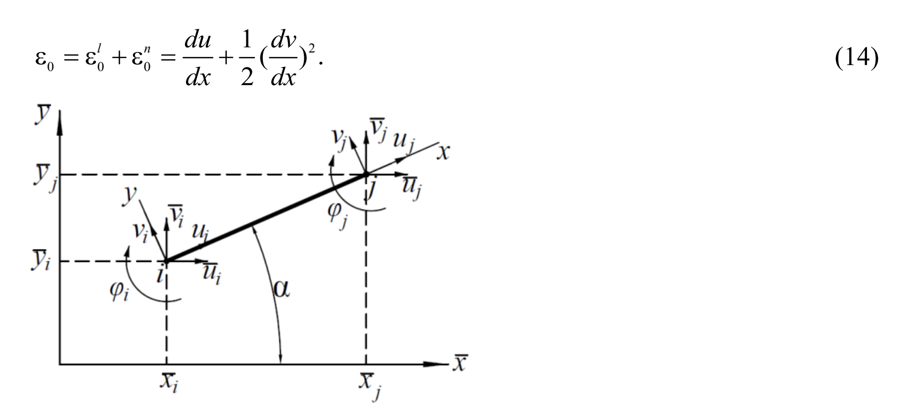



Рис. 1. Стержневой конечный элемент

Для получения системы уравнений МКЭ воспользуемся вариационным принципом Лагранжа. Потенциальная энергия деформации (ПЭД) записывается в виде:

$$\Pi = \frac{1}{2}\int_V \sigma\varepsilon^{el} dV = \frac{1}{2}\int_V E(y)\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)^2 dV. \tag{15}$$

где $\varepsilon^{el}$ — упругая деформация, равная разности между полной деформацией и деформацией ползучести.

Запишем (15) как сумму четырех интегралов:

$$\Pi = \frac{1}{2}\Bigg(\int_V E(y)\varepsilon_0^l\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV + \int_V E(y)\varepsilon_0^n\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV +$$
$$+\int_V E(y)\,y\chi\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV - \int_V E(y)\varepsilon^*\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV\Bigg) \tag{16}$$

Первый интеграл в (16) запишется в виде:

$$\int_V E(y)\varepsilon_0^l\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV = \int_0^l \varepsilon_0^l \int_A E(y)\left(\varepsilon_0^l + y\chi - \varepsilon^*\right)dA\,dx +$$
$$+\int_0^l \varepsilon_0^l \cdot \varepsilon_0^n \int_A E(y)\,dA\,dx = \int_0^l \varepsilon_0^l N dx + \int_0^l \varepsilon_0^l \cdot \varepsilon_0^n \cdot EA dx, \tag{17}$$

где $l$ — длина конечного элемента.

Второй интеграл в (16) представим в следующей форме:

$$\int_V E(y)\varepsilon_0^n\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV = \int_0^l \varepsilon_0^l \cdot \varepsilon_0^n \int_A E(y)\,dA\,dx + \int_V E(y)\left(\varepsilon_0^n\right)^2 dV +$$
$$+\int_0^l \varepsilon_0^n \cdot \chi \int_A E(y)\,y\,dA\,dx - \int_0^l \varepsilon_0^n \int_A E(y)\varepsilon^* dA\,dx, \tag{18}$$

Вторым слагаемым в правой части (18) можно пренебречь, учитывая его более высокий порядок малости. Третий интеграл в (16) записывается в виде:

$$\int_V E(y)\,y\chi\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV = \int_0^l \chi \int_A E(y)\,y\left(\varepsilon_0^l + y\chi - \varepsilon^*\right)dA\,dx +$$
$$+\int_0^l \varepsilon_0^l \chi \cdot ES dx = \int_0^l M\chi dx + \int_0^l \varepsilon_0^n \chi \cdot ES dx. \tag{19}$$

Четвертый интеграл в (16) представим в следующем виде:

$$\int_V E(y)\varepsilon^*\left(\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^n + y\chi - \varepsilon^*\right)dV = \int_0^l \chi \int_A E(y)\,y\varepsilon^* dA\,dx +$$
$$+\int_0^l \varepsilon_0^l \int_A \varepsilon^* E(y)\,dA\,dx - \int_V \left(\varepsilon^*\right)^2 E(y)\,dV + \int_0^l \varepsilon_0^n \int_A \varepsilon^* E(y)\,dA\,dx = \tag{20}$$
$$= \int_0^l \chi M^* dx + \int_0^l \varepsilon_0^l N^* dx + \int_0^l \varepsilon_0^n N^* dx - \int_V \left(\varepsilon^*\right)^2 E(y)\,dV.$$

Слагаемое $\int_V (\varepsilon^*)^2 E(y)\,dV$ при минимизации по вектору узловых перемещений обратится в нуль. Окончательно выражение для ПЭД примет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2}\Big(\int_0^l \varepsilon_0^l N dx + 2\int_0^l \varepsilon_0^l \varepsilon_0^n EA dx + \int_0^l M\chi dx + 2\int_0^l \varepsilon_0^n \chi ES dx - \int_0^l \chi M^* dx - \int_0^l \varepsilon_0^l N^* dx + \tag{21}$$

Механика

$$+2\int_0^l \varepsilon_0^n N^* dx) = \frac{1}{2}\int_0^l \{\varepsilon_0^l \quad \chi\}\left(\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix}\right) dx + N_{av}\int_0^l \varepsilon_0^n dx,$$

где $N_{av} = \varepsilon_0^l EA + \chi_{av} ES - N^*$ — средняя продольная сила в элементе, $\chi_{av}$ — среднее изменение кривизны элемента.

С учетом (12) формула (21) примет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2}\int_0^l \{\varepsilon\}^T \left([D]\{\varepsilon\} - 2\begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix}\right) dx + N_{av}\int_0^l \varepsilon_0^n dx\ , \tag{22}$$

где $\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_0^l \quad \chi\}^T$.

Для перемещений конечного элемента примем следующую аппроксимацию:

$$u(x) = u_1 + \frac{u_2 - u_1}{l} x; \tag{23}$$

$$v(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x^3; \tag{24}$$

$$\varphi(x) = \frac{dv}{dx} = \alpha_2 + 2\alpha_3 x + 3\alpha_4 x^2. \tag{25}$$

Коэффициенты полинома (24) определяются путем подстановки в (24) и (25) координат узлов:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l & l^2 & l^3 \\ 0 & 1 & 2l & 3l^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \varphi_1 \\ v_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}. \tag{26}$$

Из (26) вектор $\{\alpha\} = \{\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4\}^T$ выражается следующим образом:

$$\{\alpha\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l & l^2 & l^3 \\ 0 & 1 & 2l & 3l^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} v_1 \\ \varphi_1 \\ v_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{l^2} & -\frac{2}{l} & 0 & \frac{3}{l^2} & -\frac{1}{l} \\ 0 & \frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & 0 & -\frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \varphi_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = [\Phi]\{U\}. \tag{27}$$

С учетом (27) формула (24) примет вид:

$$v = \{\Psi\}\{U\}, \tag{28}$$

где $\Psi = \{1 \quad x \quad x^2 \quad x^3\}[\Phi]$.

Вектор $\{\varepsilon\}$ запишем в форме:

$$\{\varepsilon\} = \begin{pmatrix} \frac{du}{dx} \\ -\frac{d^2 v}{dx^2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -1/l & 0 & 0 & 1/l & 0 & 0 \\ -\frac{d^2\{\Psi\}}{dx^2} & & & & & \end{bmatrix} \cdot \{U\} = [B]\{U\}. \tag{29}$$

После подстановки (29) и (28) в (22) ПЭД запишется в виде:

$$\Pi = \frac{1}{2}\{U\}^T \int_0^l [B]^T [D][B] dx \{U\} - \{U\}^T \int_0^l [B]^T dx \begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix} + \{U\}^T N_{av} \cdot \frac{1}{2}\int_0^l \frac{d\{\Psi\}^T}{dx}\frac{d\{\Psi\}}{dx} dx \{U\}. \tag{30}$$

После минимизации функционала Лагранжа по вектору узловых перемещений приходим к системе уравнений следующего вида:

$$([K] + [K_g])\{U\} = \{F\} + \{F^*\}, \tag{31}$$

где $[K] = \int_0^l [B]^T [D][B] dx$ — матрица жесткости, $[K_g] = N_{av}\int_0^l \frac{d\{\Psi\}^T}{dx}\frac{d\{\Psi\}}{dx} dx$ — геометрическая матрица жесткости, $\{F^*\} = \int_0^l [B]^T dx \begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix}$ — вклад в вектор нагрузки деформаций ползучести, $\{F\}$ — вектор внешних узловых сил.

Решение физически и геометрически нелинейной задачи осуществляется при помощи метода Ньютона-Рафсона. Первым этапом производится расчет при $t = 0$. Приращение нагрузки выполняется квазистатически небольшими порциями с последовательным вычислением дополнительных перемещений узлов, которые обусловлены невязкой сил, корректировкой на каждом шаге касательного модуля упругости и координат узлов.

Далее временной интервал, на котором выполняется расчет, разбивается на конечное число шагов по времени. Расчет на ползучесть выполняется аналогично расчету на статическую нагрузку. Приращение деформаций ползучести на шаге $t+\Delta t$ может быть определено с использованием метода Эйлера

$$\Delta\varepsilon^{*} = \left(\frac{\partial\varepsilon_1^{*}}{\partial t} + \frac{\partial\varepsilon_2^{*}}{\partial t}\right)\Delta t. \tag{32}$$

**Результаты исследования.** Представленные уравнения и алгоритм расчета реализованы авторами в виде программы в среде Matlab. Был выполнен расчет шарнирно неподвижно опертой по концам арки параболического очертания под действием равномерно распределенной по длине нагрузки (рис. 2) при следующих исходных данных: $E_0$ = 1,48·10$^4$ МПа, $R$ = 55 МПа, $L$ = 16 м, $f$ = 3,2 м. Поперечное сечение арки принималось прямоугольным с размерами $b$ = 10 см, $h$ = 15 см. Арка разбивалась по длине на 40 конечных элементов, по высоте сечение делилось на 100 отрезков, количество шагов по времени принималось равным 600, а по нагрузке — 200. Максимальное количество итераций на каждом шаге — 20. На рис. 3 показан график зависимости максимального прогиба от нагрузки. Штриховой линии соответствует расчет в упругой постановке. Для контроля правильности результатов решение упругой задачи также выполнялось в программном комплексе ANSYS с использованием стержневых конечных элементов BEAM 188. Количество конечных элементов принималось такое же, как и в Matlab. Существенной разницы результатов выявлено не было. При расчете в упругой постановке резкий рост перемещений, соответствующий потере устойчивости, наблюдается при $q$ = 10,5кН/м, а при учете мгновенной нелинейности деформирования — при $q$ = 10кН/м.

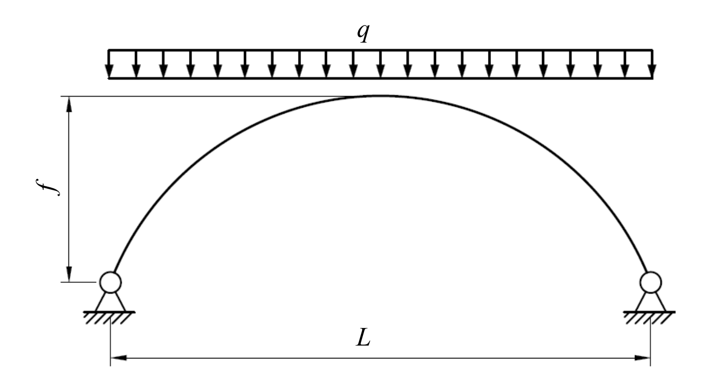



Рис. 2. Расчетная схема конструкции:
$q$ — распределённая нагрузка на арку, $f$ — стрела подъёма арки, $L$ — пролет арки

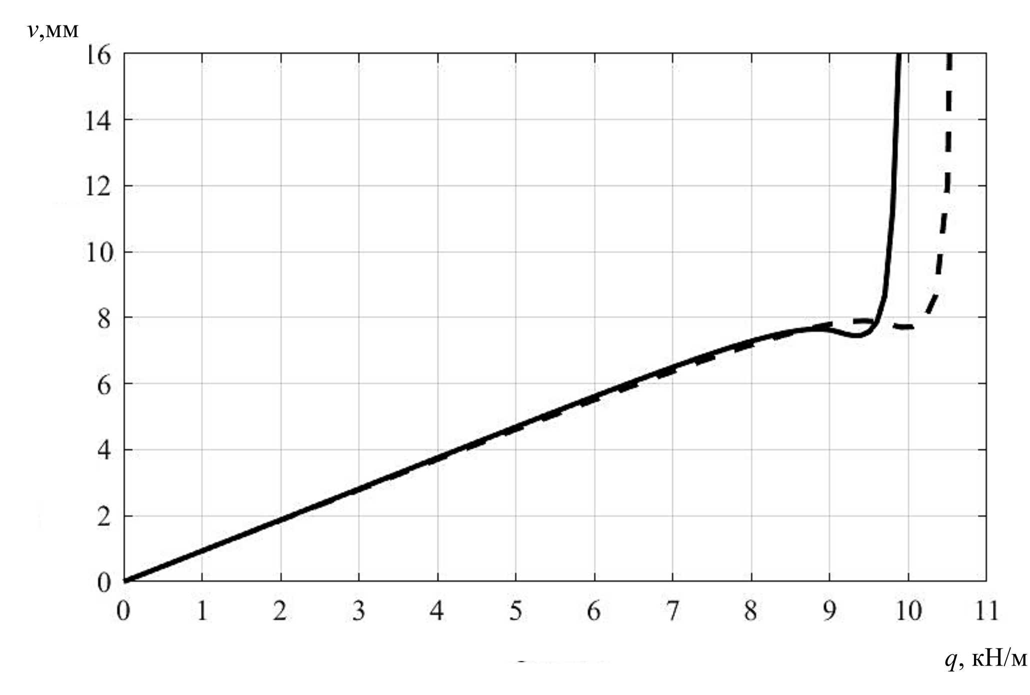



Рис. 3. Зависимость максимального прогиба арки от нагрузки при кратковременном нагружении

Механика

Расчет с учетом ползучести для данной арки показал, что даже при нагрузках, достаточно близких к мгновенной критической, рост перемещений носит ограниченный характер. На рис. 4 приведен график роста во времени прогиба в середине пролета при нагрузке $q$ = 8кН/м. Штриховой линии на данном графике соответствует решение в вязкоупругой постановке. Существенной разницы в результатах не выявлено.

Также при указанных выше исходных данных был выполнен расчет трехшарнирной арки с промежуточным шарниром в середине пролета. В этом случае мгновенная критическая нагрузка оказалась существенно ниже. При расчете в упругой постановке она составила 4 кН/м, а с учетом мгновенной нелинейности деформирования — 3,3 кН/м. Как и в предыдущем примере, даже при нагрузке, достаточно близкой к мгновенной критической, ползучесть носит затухающий характер. Кривые изменения во времени максимального прогиба при $q$ = 3кН/м приведены на рис. 5. Обозначения такие же, как и на предыдущем графике.

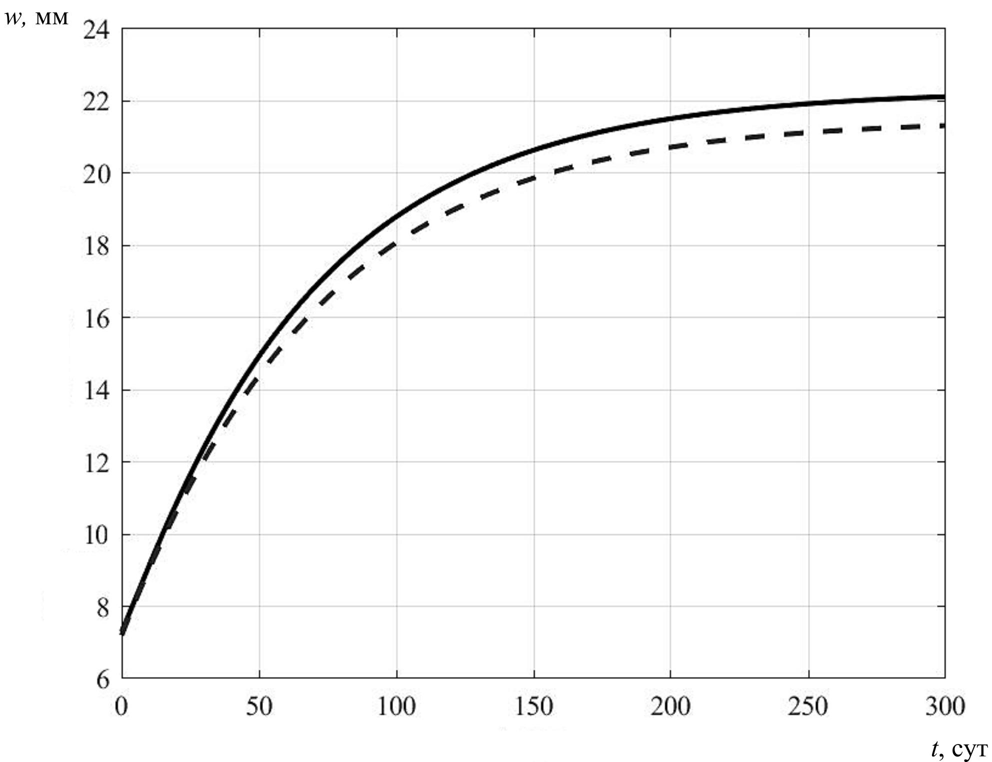



Рис. 4. Изменение прогиба в середине пролета во времени при нагрузке $q$ = 8кН/м

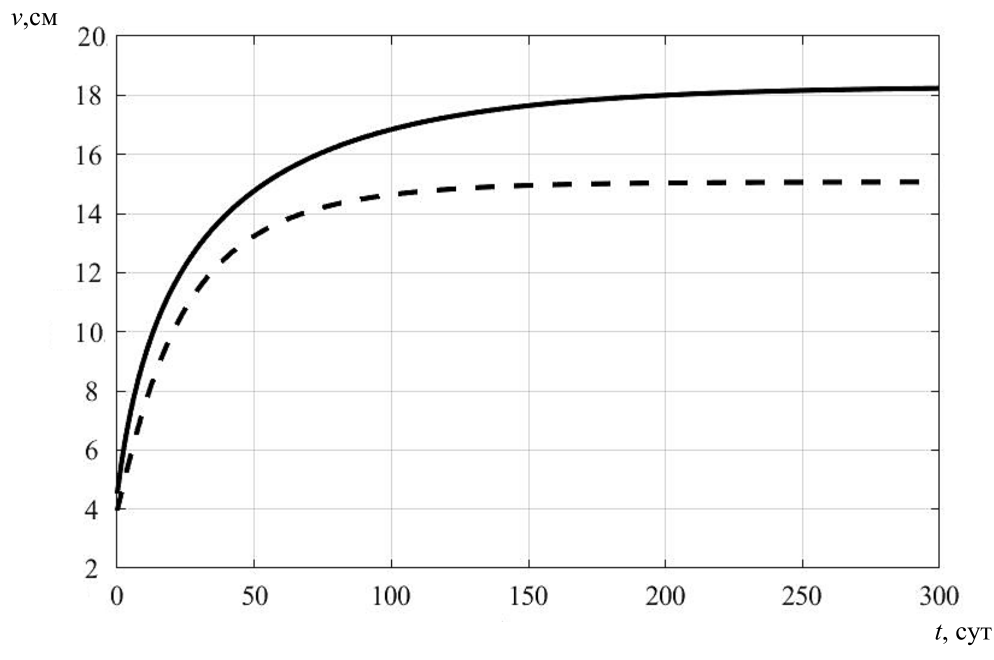



Рис. 5. Рост во времени максимального прогиба для арки с промежуточным шарниром в середине пролета при $q$ = 3 кН/м

**Обсуждение и заключения**. Полученные уравнения и разработанная методика являются универсальными и допускают применение произвольных зависимостей между напряжениями и мгновенными деформации, а также произвольных выражений для меры ползучести. Это позволяет производить расчеты конструкций, изготовленных не только из дерева, но и из любого другого материала. В результате проведенного анализа ползучести деревянных арок установлено, что в отличие от сжатых стержней, для них ползучесть носит ограниченный характер даже при нагрузках, близких к мгновенной критической.

**Библиографический список**

1. Тамразян, А. Г. Механика ползучести бетона / А. Г. Тамразян, С. Г. Есаян. — Москва : МГСУ, 2011. — 320 с.

2. Прокопович, И. Е. Прикладная теория ползучести / И. Е. Прокопович, В. А. Зедгенидзе. — Москва : Стройиздат, 1980. — 239 с.

3. Вареник, А. С. О ползучести древесины / А. С. Вареник, К. А. Вареник // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 2. — С. 88. — URL: http://www.science-education.ru/pdf/2014/2/429.pdf. (дата обращения: 19.03.2021).

4. Пятикрестовский, К. П. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций / К. П. Пятикрестовский, В. И. Травуш // Academia. Архитектура и строительство. — 2015. — №. 2. — С. 115–119.

5. Pyatikrestovsky, K. P. Nonlinear analysis of statically indeterminate wooden structures and optimization of cross section dimensions of dome ribs / K. P. Pyatikrestovsky, B. S. Sokolov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2018. — Vol. 14 (4). — P. 130−139.

6. Development of structures from solid wood for objects of infrastructure / K. P. Pyatikrestovsky, V. I. Travush, A. A. Pogoreltsev, A. A. Klyukin // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2018. — Vol. 14 (1). — P. 145–154. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154

7. Pyatikrestovsky, K. P. The Study of Complex Stress States of Elements Filling the Cells Between the Ribs of Wooden Large-Span Domes / K. P. Pyatikrestovsky, B. S. Sokolov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2019. — Vol. 15 (1). — P. 140−152.

8. Varenik, K. A. Boltzmann principle of superposition in the theory of wood creep for deformations in time / K. A. Varenik, A. S. Varenik, R. S. Sanzharovskij // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 441 (1). — 012057. — URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/441/1/012057/meta (accessed: 11.04.2021).

9. Short-term and long-term longitudinal load tests of wooden rods / K. A. Varenik, A. S. Varenik, A. V. Kirillov, M. V. Shuvalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 939 (1). — 012080. — URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/939/1/012080/meta

10. Varenik, A. S. Model of stress-strain state of wooden rod under eccentric compression and transverse load / A. S. Varenik, K. A. Varenik // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 656 (1). — 012052. — URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/656/1/012052/pdf

11. The buckling of the physically nonlinear frame-rod structural systems / K. O. Dubrakova, S. V. Dubrakov, F. V. Altuhov, D. H. Galaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 698 (2). — 022007. — http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022007

12. Дмитриева, К. О. Вопросы устойчивости стержневых элементов конструктивных систем из древесины при силовом и средовом нагружении / К. О. Дмитриева // Строительство и реконструкция. — 2016. — № 4. — С. 14–18.

13. Клюева, Н. В. Вопросы устойчивости стержневых элементов конструктивных систем из древесины различных пород при силовом и средовом нагружении в условиях повышенной влажности / Н. В. Клюева, К. О. Дмитриева // Строительство и реконструкция. — 2016. — № 5. — С. 60–68.

14. Вареник, А. С. Длительная несущая способность деревянных конструкций / А. С. Вареник, К. А. Вареник // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2014. — № 2. — С. 23–30.

15. Пятикрестовский, К. П. К вопросу о выборе модулей упругости при расчете деревянных конструкций на прочность, устойчивость и по деформациям / К. П. Пятикрестовский // Строительная механика и расчет сооружений. — 2012. — № 6. — С. 73–79.

Поступила в редакцию 28.04.2021
Поступила после рецензирования 02.06.2021
Принята к публикации 04.06.2021

*Об авторах:*

**Языев Сердар Батырович,** доцент кафедры «Техническая механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ScopusID: 57190970024, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7839-7381, russiangel@mail.ru

**Андреев Владимир Игоревич,** заведующий кафедрой «Сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет», (129337, РФ, г. Москва, Ярославское ш., 26), доктор технических наук, профессор, академик РААСН, ResearcherID: T-9006-2017, ScopusID: 57198780961, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1057-4329, asv@mgsu.ru

**Чепурненко Антон Сергеевич,** доцент кафедры «Сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344002, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID: E-4692-2017, ScopusID: 56056531000, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9133-8546, anton_chepurnenk@mail.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

С. Ю. Языев — формирование основной концепции, получение разрешающих уравнений, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; В. И. Андреев — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; А. С. Чепурненко — участие в разработке программы расчета, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

# МЕХАНИКА
# MECHANICS





УДК 531 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-123-132

## Напряженно-деформированное состояние торообразного баромембранного аппарата комбинированного типа



**С. И. Лазарев, О. В. Ломакина, В. Е. Буланов, И. В. Хорохорина**
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (г. Тамбов, Российская Федерация)

***Введение.*** В настоящее время очистка сточных вод и технологических растворов мембранными методами считается перспективным способом обезвреживания жидких отходов. Поэтому вопрос разработки инженерной методики расчета баромембранных аппаратов является актуальным**.** Рассмотрены работы по методам расчета конструктивно-технологических параметров, проектированию мембранного оборудования, исследованиям технологических особенностей мембранных устройств, подбору расчетных схем, методов расчета на прочность и жесткость.

***Материалы и методы.*** Рассмотрены базовые элементы корпуса мембранного аппарата комбинированного типа, предложена расчетная схема и описана методика расчета на прочность и жесткость основного несущего элемента — крышки.

***Результаты исследования.*** Методика позволяет определить необходимые размеры оболочек и пластин для разработки мембранного аппарата комбинированного типа, оценить прочностные свойства аппаратов данного класса. Элементы конструкции аппарата (в первую очередь, несущие крышки) должны удовлетворять не только требованиям эффективности, качества разделения и очистки растворов, но и условиям безопасной эксплуатации. Поэтому проектирование крышек аппаратов должно производиться исходя из оптимальных конструктивных размеров (толщин круглых пластин, тороидальных оболочек и опорных колец). Для апробирования методики выполнен расчет напряженно-деформированного состояния конструкции мембранного аппарата на прочность и жесткость. В качестве примера рассмотрена одна крышка, представленная в форме открытой торообразной оболочки. Проведенная оценка применения данной методики, с учетом того, что оболочка сопряжена по внутреннему диаметру с круглой пластиной, а по внешнему — с кольцом, позволила определить необходимые размеры оболочек и пластин для проектирования и разработки аппарата.

***Обсуждение и заключения.*** Полученная методика аналитического описания механического воздействия на элементы комбинированного аппарата и выполненный пример расчета торообразной оболочки и пластины позволяют оценить напряженно-деформированное состояние конструкции на прочность и жесткость. Приведены результаты расчета крышек из различных материалов при различном давлении. Нагружение комбинированного аппарата трансмембранным давлением позволило определить необходимые размеры оболочек и пластин для его проектирования и разработки.

***Ключевые слова:*** напряженно-деформированное состояние, торообразные пластины, мембранный аппарат, прочностные характеристики, расчетная схема.

***Для цитирования:*** Напряженно-деформированное состояние торообразного баромембранного аппарата комбинированного типа / С. И. Лазарев, О. В. Ломакина, В. Е. Буланов, И. В. Хорохорина // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 123–132. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-123-132





## Stress-strain state of a combined toroidal baromembrane apparatus

**S. I. Lazarev, O. V. Lomakina, V. E. Bulanov, I. V. Khorokhorina**
Tambov State Technical University (Tambov, Russian Federation)

***Introduction.*** Currently, the purification of wastewater and technological solutions by membrane methods is considered a promising way to neutralize liquid waste. Therefore, the task of developing an engineering method for calculating baromembrane devices is a challenge. Studies on methods involving calculation of design and process variables, membrane equipment design, research of technological features of membrane devices, selection of design schemes, as well as methods of strength and rigidity analysis, are investigated.

***Materials and Methods.*** Basic elements of the body of the combined membrane apparatus are considered, a design scheme is proposed, and a method for calculating the strength and rigidity of the main load-bearing element, the cover, is described.

***Results.*** The methods determine the required dimensions of shells and plates for the development of a combined membrane apparatus, and evaluate the strength properties of the devices of this class. The construction elements of the apparatus (primarily, the load-bearing covers) must meet not only the requirements of efficiency and quality of separation and cleaning of solutions, but also the conditions for safe operation. Therefore, the design of the device covers should be based on the optimal design dimensions (thicknesses of round plates, toroidal shells, and support rings). To test the method, the stress-strain state of the membrane apparatus structure was calculated for strength and rigidity. As an example, we consider one cover presented in the form of an open toroidal shell. The evaluation of the application of this technique, taking into account the fact that the shell is mated with a round plate in the inner diameter, and with a ring in the outer diameter, has provided the determination of the required parameters.

***Discussion and Conclusions.*** The obtained method of analytical description of the mechanical impact on the elements of the combined apparatus and the example of calculating the toroidal shell and plate, enables to evaluate the stress-strain state of the structure for strength and rigidity. The results of the calculation of covers made of various materials at different pressures are presented. Loading the combined apparatus with transmembrane pressure made it possible to determine the required dimensions of the shells and plates for its design and development.

***Keywords:*** stress-strain state, toroidal plates, membrane apparatus, strength characteristics, design scheme.

***For citation:*** S. I. Lazarev, O. V. Lomakina, V. E. Bulanov, I. V. Khorokhorina. Stress-strain state of a combined toroidal baromembrane apparatus. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 123–132. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-123-132

**Введение**. За последние 25 лет развитие мембранной технологии значительно ускорилось. Усовершенствованию установок и аппаратов мембранного вида посвящено немало работ. Так в работе [1] была спроектирована, построена и испытана оригинальная лабораторная установка планарной геометрии мембранной дистилляции для будущего соединения с солнечной энергией. Несмотря на концептуальную простоту, оригинальная геометрия была разработана для того, чтобы обеспечить многоступенчатую компоновку, компактность, внутреннюю рекуперацию тепла и возможную интеграцию с полимерным теплообменником для окончательного нагрева рассола с помощью солнечной энергии или отработанного тепла. Кроме того, было исследовано влияние свободного воздушного зазора, проницаемого зазора и частичного вакуумного расположения воздушных зазоров.

Авторы в [2] предлагают метод многокритериальной оптимизации для определения режимных и геометрических параметров газоструйных аппаратов, приводят результаты расчетов двухступенчатой установки.

В статье [3] на основе концепции создания в аппарате направленного движения материальных потоков рассмотрена возможность интенсификации процессов смешивания сыпучих материалов за счет оптимизации конструкции аппарата. Приведены результаты экспериментальных исследований на модели центробежного смесителя с ротором в виде полого усеченного конуса с волнообразной верхней кромкой. Показано, что модернизация ротора обеспечивает повышение эффективности процесса смешивания в пересекающихся потоках сыпучего материала, позволяя повысить сглаживающую способность аппарата и интенсивность смешивания без дополнительных затрат энергии.

В статье [4] рассматриваются последние разработки по усовершенствованию конструкции мембранного модуля с помощью технологии 3D-печати. В настоящее время существуют стандарты проектирования и расчета прочности аппаратов высокого давления. Работа [5] содержит общую характеристику разработанных стандартов, рассматривает их структуру, подходы, методы расчета и проектирования, а также основные отличия от

предыдущих нормативных документов. Авторы в [6] рассматривают вопросы, связанные с расчетом времени выделения пермеата из разделяемой системы при работе баромембранной установки с наиболее распространенным замкнутым контуром циркуляции. Инженерная методика расчета оптимальных конструктивных параметров фланца электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа описана в статье [7]. В работах [8–10] авторы разработали конструкцию электробаромембранного аппарата трубчатого типа для очистки технологических растворов, предложили модифицированные уравнения для теоретического расчета и прогнозирования производительности и качества процесса электронанофильтрации. Анализу напряженно-деформированного состояния, учитывающего преобразование формы конструкции путем складывания повторяющихся фрагментов в плоскости наименьшей жесткости, посвящена статья [11]. Также для анализа и моделирования напряженно-деформированного состояния различных элементов аппаратов часто прибегают к методу конечных элементов. Так в работе [14] смоделирован процесс взаимодействия абразивной частицы и поверхности детали, проанализировано ее напряженно-деформированное состояние. Представлены результаты численных экспериментов, которые позволили установить, как распределяются эквивалентные пластические деформации при глубинах внедрения конуса 0,01 мм и 0,05 мм. Таким образом, авторы занимаются вопросами исследования технологических особенностей таких устройств, подбором расчетных схем, методов расчета на прочность и жесткость. В данной работе авторами предложено оптимизировать конструкцию с целью снижения материальных затрат.

Выполненный обзор источников [1–11] по методам расчета конструктивно-технологических параметров и проектирования мембранного оборудования, позволил сформулировать цель работы — разработать перспективную конструкцию аппарата комбинированного типа, определить механические нагрузки на его части, выработать рекомендации по проектированию. Элементы конструкции аппарата (в первую очередь, несущие крышки) должны удовлетворять не только требованиям эффективности и качества разделения и очистки растворов, но и условиям безопасной эксплуатации [12–13]. Поэтому проектирование крышек аппаратов должно производиться исходя из оптимальных конструктивных размеров (толщин круглых пластин, тороидальных оболочек и опорных колец).

**Материалы и методы.** Базовыми элементами корпуса данного аппарата являются верхняя и нижняя крышки. Они соединены между собой замковым байонетным кольцом (рис. 1). Исходя из того, что крышки имеют одинаковые геометрические размеры, а их нагружение различается только на величину собственного веса, рассматривать будем лишь одну — верхнюю.

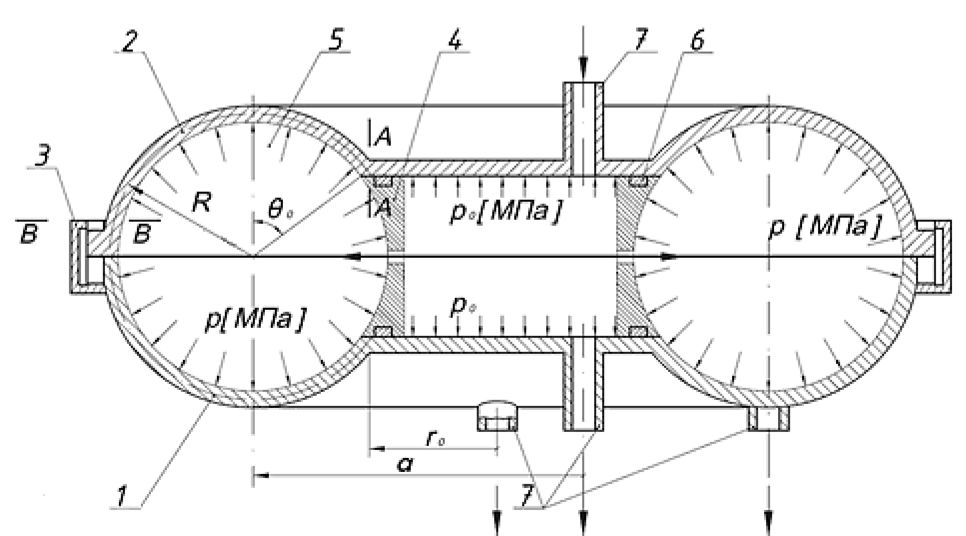



Рис. 1. Конструкция баромембранного аппарата: 1 — крышка нижняя; 2 — крышка верхняя; 3 — кольцо замковое байонетное; 4 — плоскокамерный модуль; 5 — трубчатый модуль; 6 — уплотнение; 7 — входной и выходной патрубки

Рассмотрим расчетную схему данной конструкции (рис. 2). Верхняя крышка находится под воздействием давления на круглую пластину со стороны плоскокамерного модуля и на стенку торообразной оболочки со стороны трубчатого модуля. Показываем неизвестные внутренние усилия в сечениях: А–А (сопряжение оболочки и круглой пластины), В–В (оболочки и кольца), продольную силу $T_{MB}$, поперечные силы $Q_A$, $Q_B$, изгибающие моменты $M_A$.

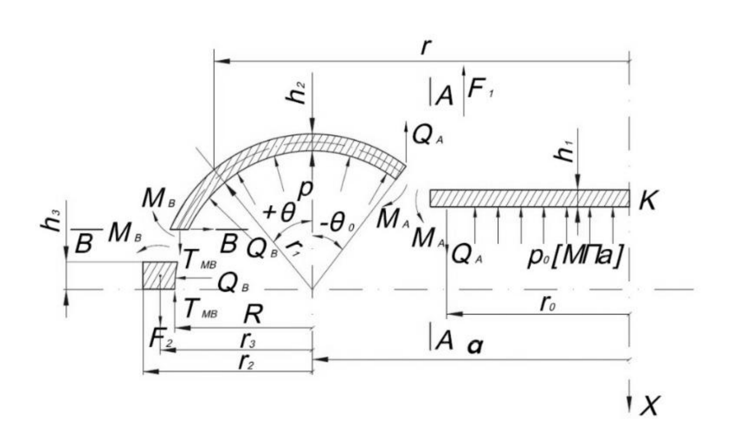



Рис. 2. Расчетная схема крышки

Данные усилия распределены по окружности и, за исключением $T_{MB}$, являются неизвестными. Они могут быть найдены из условия совместности деформаций.

Введем обозначения: $N_\theta^*, N_\phi^*, Q^*, M_A^*$ — усилия, обусловленные действием давления $p$ и осевой силы $F$; $R$ — радиус меридионального сечения тора; $a$ — радиус круговой оси тора; $r_0$ — радиус круглой пластины; $F_1 = p_0 \pi r_0^2$ — осевая сила ($\theta = \theta_1$); $\theta_0$ — угол в месте сопряжения торообразной оболочки и круглой пластины; $\theta$ — переменный угол сечения оболочки; $\phi_B^K$ — угол поворота кольца; $E, \nu$ — модуль упругости материала оболочки и коэффициент Пуассона; $\vartheta_A^{ПЛ}$ — угол поворота пластины; $h_2$ — толщина оболочки; $h_3$ — толщина кольца; $p_0$ — давление на пластину; $\xi_B^K$ — радиальное перемещение кольца; $D_1 = \dfrac{Eh_1}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость пластины; $N = ph_3(a+R) + Q_B(a+R)$ — кольцевое тангенциальное усилие; $M = P(a+r_3)^2 - T_{MB}(a+R)^2 + M_B(a+R) + Q_B(a+R)\dfrac{h_3}{2}$ — кольцевой изгибающий момент; $F_2 = p_0\pi r_0^2 + p\pi[(a+R)^2 - r_0^2]$ — осевое усилие, приходящееся на кольцо при $\theta = \theta_0$; $\alpha = \dfrac{R}{a}$; $\lambda = \sqrt[6]{12(1-\nu^2)} \cdot (\alpha\beta)^{1/3}$; $\beta = \dfrac{R}{h_2}$; $T_{MB} = \dfrac{F_2}{2\pi(a+R)}$; $I_1 = h_3 \ln\left(\dfrac{a+r_2}{a+R}\right)$; $I_3 = \dfrac{h_3^3}{12}\ln\left(\dfrac{a+r_2}{a+R}\right)$ — геометрические характеристики кольцевого сечения.

Сечение А–А (сопряжение оболочки и круглой пластины)

$$\left.\begin{aligned} u_A^* + \alpha_{11}(Q_A - Q_A^*) + \alpha_{12}(M_A - M_A^*) = u_A^{ПЛ} \\ \vartheta_A^* + \alpha_{12}(Q_A - Q_A^*) + \alpha_{22}(M_A - M_A^*) = -\vartheta_A^{ПЛ} \end{aligned}\right\}. \tag{1}$$

Сечение В–В (оболочка и кольцо)

$$\left.\begin{aligned} u_B^* + \alpha_{11}(Q_B - Q_B^*) + \alpha_{12}(M_B - M_B^*) = \xi_B^K; \\ \vartheta_B^* + \alpha_{12}(Q_B - Q_B^*) + \alpha_{22}(M_B - M_B^*) = \phi_B^K. \end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

где радиальные и угловые перемещения оболочки $u_A^*, u_B^*, \vartheta_A^*, \vartheta_B^*$ в сечениях А–А и В–В, вызванные внутренним давлением $p$, определяются по формулам:

$$u^* = \frac{a(1+\alpha\cdot\sin\theta)}{Eh_2}(N_\phi^* - \nu N_0^*);$$

$$\vartheta^* = -\sqrt{12(1-\nu^2)}\,\frac{F_1\cdot\lambda}{2\pi E h_2^2}\phi(\theta)\,\mathrm{Re}[-\lambda\omega(\theta)]; \tag{3}$$

$$N_\theta^* = \frac{pR}{2}\left[\frac{2+\alpha\sin\theta}{1+\alpha\sin\theta} - \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta}\cdot\frac{2+\alpha\sin\theta_0}{1+\alpha\sin\theta}\right] + \frac{F_1}{2\pi\alpha}\cdot\frac{1}{\sin\theta(1+\alpha\sin\theta)}$$
$$-\frac{F_1}{2\pi\alpha}\cdot\frac{\varphi(\theta)\cos\theta}{1+\alpha\sin\theta}\cdot\left\{\lambda I_m E[-\lambda\omega(\theta)] + \frac{1}{\omega(\theta)}\right\}. \tag{4}$$

$$N_{\varphi}^{*}=\frac{pR}{2}\left[1+\frac{\sin\theta_0}{\alpha}\cdot\frac{2+\alpha\cdot\sin\theta_0}{\sin^2\theta}\right]-\frac{F_1}{2\pi r_1}\cdot\frac{1}{\sin^2\theta}-\frac{F_1}{2\pi r_1}\times$$
$$\times\left\{-\lambda^2\varphi(\theta)\omega'(\theta)I_mE'\left[-\lambda\omega(\theta)\right]+\lambda\varphi'(\theta)I_mE\left[-\lambda\omega(\theta)+\frac{\varphi'(\theta)}{\omega(\theta)}-\frac{\varphi(\theta)\omega'(\theta)}{\omega^2(\theta)}\right]\right\}, \tag{5}$$

$$Q_B^{*}=N_{\theta}^{*}\cos\theta-\frac{F_1\lambda\sin^2\theta}{2\pi a\left(1+\alpha\sin\theta\right)}\left\{I_mE\left[-\lambda\omega(\theta)\right]+\frac{1}{\lambda\omega(\theta)}\right\},$$
$$M_{\theta}^{*}=\frac{1}{\sqrt{12\left(1-\nu^2\right)}}\cdot\frac{F_1h_1\lambda^2}{2\pi R}\left[\varphi(\theta)\omega'(\theta)\cdot\operatorname{Re}E'\left[-\lambda\omega(\theta)\right]\right], \tag{6}$$
$$M_{\varphi}^{*}=\nu M_{\theta}^{*}.$$

Оболочку можно считать длинной, если выполняется неравенство

$$\left|\omega(\theta_2)-\omega(\theta_1)\right|>\frac{3,0}{\lambda}. \tag{7}$$

Для такого вида торообразной оболочки коэффициенты при $M$ и $Q$ в уравнениях (1)–(2) определяются по формулам:

$$\alpha_{11}=\frac{a}{\alpha}\lambda\omega_0{}'(1+\alpha\cdot\sin\theta_1)^2+\frac{\left[\operatorname{Re}h_{10}{}'\right]^2+[I_mh_{10}{}']^2}{\operatorname{Re}h_{10}I_mh_{10}{}'-I_mh_{10}\cdot\operatorname{Re}h_{10}{}'}\cdot\frac{1}{Eh_2}; \tag{8}$$

$$\alpha_{12}=-\sqrt{12(1-\nu^2)}\cdot a(1+\alpha\cdot\sin\theta_1)\cdot\frac{\operatorname{Re}h_{10}\cdot\operatorname{Re}h_{10}{}'+I_mh_{10}\cdot I_mh_{10}{}'}{\operatorname{Re}h_{10}I_mh_{10}{}'-I_mh_{10}\cdot\operatorname{Re}h_{10}{}'}\cdot\frac{1}{Eh_2^2}; \tag{9}$$

$$\alpha_{22}=12(1-\nu^2)\frac{R}{\lambda\omega_0{}'}\cdot\frac{[\operatorname{Re}h_{10}]^2+[I_mh_{10}]^2}{\operatorname{Re}h_{10}\cdot I_mh_{10}{}'-I_mh_{10}\cdot\operatorname{Re}h_{10}{}'}\cdot\frac{1}{Eh_2^3}. \tag{10}$$

В таблицах (1–5)[1] приведены значения функций $\phi(\theta),\omega(\theta),\omega'(\theta),\operatorname{Re}h_1,\operatorname{Re}h_1{}',\operatorname{Re}[-\lambda\omega(\theta)],I_mE[-\lambda\omega(\theta)],I_mh_1,I_mh_1{}'$. Данные зависимости будут справедливы для случая, когда $\lambda^3>5$. Их можно получить, используя метод асимптотического интегрирования [14].

Угловые и линейные перемещения кольца и круглой пластины могут быть выражены

$$\vartheta_A^{ПЛ}=-\frac{p_0r_0^3}{8D_1(1+\nu)}+\frac{M_Ar_0}{D_1(1+\nu)}; \tag{11}$$

$u_A^{ПЛ}=0$ — пластина в своей плоскости нерастяжима;

$$\xi_B^K=\frac{N}{EI_1}+\frac{\phi h_3}{2}; \tag{12}$$

$$\phi_B^K=\frac{M}{EI_3}, \tag{13}$$

Определяя неизвестные усилия в точках сопряжения оболочки, пластины и кольца $M_A,Q_A,M_B,Q_B$, можно определить напряжения и деформации в любом сечении крышки:
для круглой пластины

$$\sigma_{\phi\max}=\frac{6M_{\phi}}{h_1^2}; \tag{14}$$

$$\sigma_{r\max}=\frac{6Mr}{h_1^2}=\nu\cdot\sigma_{\phi\max}; \tag{15}$$

для торообразной оболочки

$$\sigma_{\theta\max}=\sigma_{\theta\max}^{(u)}+\sigma_{\theta\max}^{(p)}=\frac{6M_{\theta}}{h_2^2}+\frac{1+0,5\alpha\cdot\sin\theta}{1+\alpha\cdot\sin\theta}\cdot\frac{pr_1}{h_2}; \tag{16}$$

$$\sigma_{\phi\max}=\sigma_{\phi\max}^{(u)}+\sigma_{\phi\max}^{(p)}=\frac{6M_{\phi}}{h_2^2}+\frac{pr_1}{h_2}, \tag{17}$$

[1] Биргер, И. А. Прочность, устойчивость, колебания / И. А. Биргер, А. Я. Пановко // Справочник в 3-х томах. Т.1 Москва: Машиностроение». 1988. 415 с.

где $\sigma^{(p)}_{\theta\max}, \sigma^{(p)}_{\phi\max}$ — растягивающие напряжения, найденные по безмоментной теории; $\sigma^{(u)}_{\theta\max}, \sigma^{(u)}_{\phi\max}$ — напряжения от изгиба.

Максимальные нормальные напряжения в кольце

$$\sigma^{K}_{\max} = \frac{N}{(a+R)} + \frac{M \cdot h_3/2}{(a+R)I_3}. \quad (18)$$

Для наибольших напряжений и перемещений в торообразной оболочке используем формулы [15]:
для случая $\theta_* = 0$,

$$\sigma^{p}_{\phi} = \sigma_v \cdot 2{,}15(1-\nu^2)^{1/3} \cdot \alpha^{-1/3} \cdot \beta^{2/3} + \frac{pR}{h_2},$$

в точке $\theta_* = \pm\frac{1{,}225}{\lambda}$,

$$\sigma_{\theta} = \pm\sigma_v \cdot 2{,}99(1-\nu^2)^{-1/6} \cdot \alpha^{-1/3} \cdot \beta^{2/3}\left[\phi(\theta_*)\omega'(\theta_*)\right] + \frac{1+0{,}5\alpha\cdot\sin\theta_*}{1+\alpha\cdot\sin\theta_*}\cdot\frac{pR}{h_2}, \quad (19)$$

где $\sigma_v = \frac{F_0}{2\pi a h_2}; F_0 = p\pi r_0^2 + p_0\pi(a^2 - r_0^2)$.

Рассчитать максимальное осевое перемещение в точке А ($\theta = \theta_1$) и максимальный прогиб в центре пластины можно по формулам:

$$\delta_A = u_{XA} = \frac{2}{\lambda^3}\cdot\frac{12(1-\nu^2)\cdot R^3}{4Eh_2^3\cdot a}\cdot F_1, \quad (20)$$

$$u^{ПЛ}_{K} = u_{XA} + \frac{(5+\nu)p_0 r_0^4}{(1+\nu)\cdot 64D_1} + \frac{M_A\cdot r_0^2}{(1+\nu)\cdot 2D_1}. \quad (21)$$

Условие прочности можно выразить (IV теория)

$$\sigma^{IV}_{Э} = \sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-\sigma_1\sigma_2-\sigma_1\sigma_3-\sigma_2\sigma_3} \le [\sigma], \quad (22)$$

а условие жесткости

$$u_{X\max} \le [u_X], \quad (23)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения в опасных точках крышки; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала крышки, $[u_X]$ — допускаемый прогиб для крышки в осевом направлении.

**Результаты исследования.** На рис. 3 представлена расчетная схема торообразной оболочки.

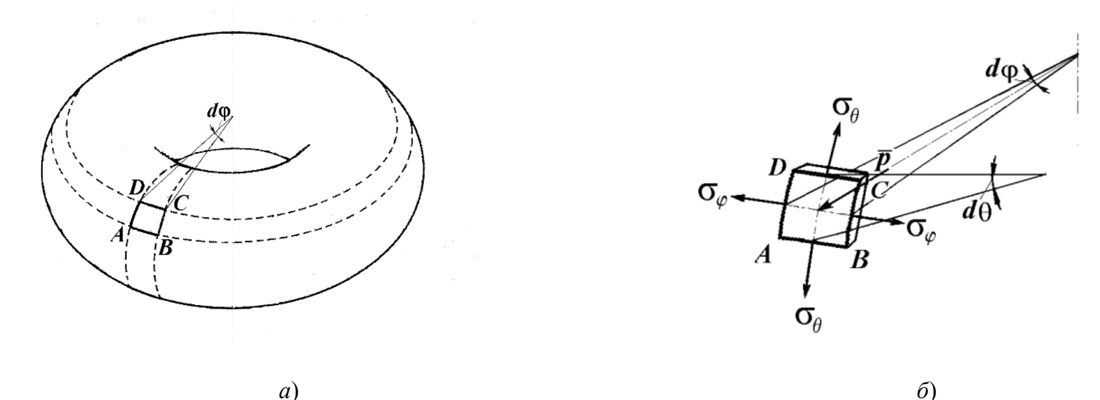



Рис. 3. Расчетная схема торообразной оболочки:
*а* — торообразная оболочка; *б* — элемент оболочки под действующим давлением

Во время рабочего процесса аппарата действует рабочее давление $p_0$ со стороны плоскокамерного модуля на круглую пластину, со стороны трубчатого модуля на стенки оболочки действует давление $p$, которое в своем максимальном значении составляет около трети от рабочего.

Кроме зон закрепления оболочки, в которых возникают значительные напряжения, вызванные изгибным эффектом, учитывая тонкость оболочки ($\frac{\delta}{R} \le \frac{1}{20}$) можно принять, что напряжения, возникающие в оболочке, постоянны по толщине. В этом случае теория называется безмоментной теорией.

Из оболочки, изображенной на рис. 3 *а*, выделим двумя меридиональными плоскости (т.е. плоскостями, проходящими через ось вращения оболочки) с углом $d\phi$ между ними и двумя плоскостями, перпендикулярными оси тора *AB* и *CD*, элемент *ABCD*.

Нормальные напряжения, действующие по граням *AC* и *BD*, в направлении касательной к окружности, называются окружными напряжениями $\sigma_\phi$. Нормальные напряжения, действующие по граням *AB* и *CD* в меридиональном направлении, называют меридиональными напряжениями $\sigma_\theta$. Кроме напряжений $\sigma_\phi$ и $\sigma_\theta$ на элемент оболочки перпендикулярно поверхности действует внутреннее избыточное давление *p*.

Уравнение, связывающее между собой эти три величины, является основным в безмоментной теории оболочек и называется уравнением Лапласа:

$$\frac{\sigma_\phi}{r}+\frac{\sigma_\theta}{R}=\frac{p}{\delta}, \qquad (24)$$

где *R* — радиус срединной поверхности тора; *r* — расстояние до оси вращения; $\delta$ — толщина стенки тора.

Для рассматриваемой оболочки и при отсчете угла $\theta$ от вертикальной оси в [13] предлагаются следующие формулы:

для наружной части тора $\left(0^\circ \le \theta \le 90^\circ\right)$

$$\sigma_\theta=\frac{p}{2\delta}\left[\frac{\left(a+R\sin\theta\right)^2-a^2}{\left(a+R\sin\theta\right)\sin\theta}\right],$$

$$\sigma_\phi=\frac{p}{\delta}\left[\left(a+R\sin\theta\right)-\frac{\left(a+R\sin\theta\right)^2-a^2}{2R\sin\theta}\right] \qquad (25)$$

для внутренней части тора $\left(\theta_0 \le \theta \le 0^\circ\right)$

$$\sigma_\theta=\frac{p}{2\delta}\left[\frac{a^2-\left(a+R\sin\theta\right)^2}{\left(a+R\sin\theta\right)\left|\sin\theta\right|}\right],$$

$$\sigma_\phi=\frac{p}{\delta}\left[\left(a+R\sin\theta\right)+\frac{a^2-\left(a+R\sin\theta\right)^2}{2R\sin\theta}\right]. \qquad (26)$$

где *a* — радиус круговой оси тора.

Из условия статического равновесия оболочки, отсеченной цилиндрическим сечением радиуса *a*, учитывая, что кольцевые волокна при $\theta=0^\circ$ не деформируются $\sigma_\phi=0$, а $\sigma_\theta$ может быть найдена по формуле:

$$\sigma_\theta=\frac{pR}{\delta}, \qquad (27)$$

для напряжений $\sigma_\phi$ предложена упрощенная формула

$$\sigma_\phi=pR\sin\frac{\theta}{2\delta}. \qquad (28)$$

При проектном расчете с погрешностью до 5 % необходимая толщина торообразной оболочки может быть найдена

— по меридиональным напряжениям

$$\delta\ge\frac{pR}{\left[\sigma_p\right]}. \qquad (29)$$

— по окружным напряжениям

$$\delta\ge\frac{pR\sin\theta}{2\left[\sigma_p\right]}. \qquad (30)$$

Из полученных величин выбирают большее значение.

При этом для сосудов и аппаратов, работающих под избыточным давлением, стандарт[2] рекомендует следующее условие прочности:

$$S\ge S_p+C, \qquad (31)$$

[2]СТП 10–04–02 Расчет на прочность сосудов и аппаратов. Том 1. Расчет на прочность вертикальных и горизонтальных аппаратов / ООО НТП «Трубопровод». Москва, 2005. 190 с.

где $C$ — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм; $S_p$ — расчетная толщина стенки (в нашем случае $S_p = \delta$).

Расчет круглой пластины с отверстием, нагруженной внутренним давлением, производится по формулам (32)–(34).

Расчетная толщина пластины:

$$S_{1p} = K \cdot K_0 \cdot D\sqrt{\frac{p}{[\sigma]}}. \qquad (32)$$

Условие выполнения прочности пластины

$$S_1 \geq S_{1p} + C. \qquad (33)$$

**Обсуждение и заключения**. Значение коэффициента $K$ определяется в зависимости от вида соединения частей крышки и для данного варианта соответствует значениям:

$$\frac{S-C}{S_1-C} \leq 0,5; \; K = 0,41$$

$$\frac{S-C}{S_1-C} \geq 0,5; \; K = 0,38$$

Во всех случаях толщина круглой пластины должна быть больше или равна толщине торообразной части.

Значение коэффициента ослабления для пластин, имеющих одно отверстие $K_0$:

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2}, \qquad (34)$$

где $d$ — диаметр отверстия.

Если неравенство $\frac{S_1-C}{D} \geq 0,11$; $S_1 - CD \geq 0,11$ s1-CD≥0,11 не выполняется, вводится поправочный коэффициент:

$$K_p = \frac{2,2}{1+\sqrt{1+\left(6\frac{S_1-C}{D}\right)^2}}; \; K_p = 2,21+1+\left(6S_1 - CD\right)2.$$

Необходимо учитывать, что прочностные характеристики стеклопластика во многом более высокие, чем у стали. Предел прочности (для металлов — предел текучести) для стали составляет 240 МПа, для алюминия — 50–440 МПа, для стеклопластика — 800–1700 МПа[3]. Однако, необходимо учитывать, чтó является связующим веществом. Им могут быть полиэфирные, фенол-формальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические смолы, полиамиды, алифатические полиамиды, поликарбонаты и др. Выбор связующего вещества оказывает влияние на величину предела прочности стеклопластика.

Допускаемое избыточное внутреннее давление в торообразной части:

$$[p] = \frac{[\sigma](S-C)}{R}. \qquad (35)$$

Допускаемое давление на круглую пластину определяется по формуле

$$[p] = \left(\frac{S_1 - C}{K \cdot K_0 \cdot D}\right)^2 \cdot [\sigma]. \qquad (36)$$

В дальнейшем рассчитанная величина допускаемого избыточного давления умножается на этот коэффициент.

Используя данные таблиц «Физико-механические характеристики композиционного материала» и «Сравнение физико-механических показателей различных материалов», произведем расчет.

В таблице 1 приведены результаты расчета крышек из различных материалов при различном давлении. В числителе приведены толщины тороидальной части, в знаменателе — круглой пластины.



[3]Сравнительная характеристика свойств стеклопластика, стали и алюминиевых сплавов / Аквапром : [сайт]. URL: www.aquaprom24.ru (дата обращения: 22.03.2021).

Таблица 1

Расчет толщин крышек

| Давление, МПа | Материалы | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ПА 6–210/310 ОСТ 6–06-С9–93 | ПА66-ЛТО-СВ30 | Ст. 3 | Композит[4] |
| 0,5 | 0,62/3,46 | 0,31/2,45 | 0,25/2,19 | 0,22/2,14 |
| 1 | 1,24/4,89 | 0,62/3,45 | 0,50/3,09 | 0,45/2,92 |
| 2 | 2,48/6,92 | 1,24/4,87 | 0,99/4,36 | 0,89/4,04 |
| 3 | 3,69/8,47 | 1,85/5,96 | 1,49/5,35 | 1,34/5,02 |
| 5 | 6,18/10,93 | 3,09/7,71 | 2,47/6,91 | 2,23/6,53 |
| 10 | 12,32/15,46 | 6,16/10,91 | 4,93/9,77 | 4,48/9,23 |

Во всех случаях к этим величинам добавляется величина $c$ — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок (величина СТП 10–04–02 не нормируется).

Приведенная методика аналитического описания механического воздействия на элементы комбинированного аппарата и выполненный пример расчета торообразной оболочки и пластины позволяют оценить напряженно-деформированное состояние конструкции на прочность и жесткость. Трансмембранное давление, оказываемое на комбинированный аппарат, дало возможность авторам определить необходимые размеры оболочек и пластин для его проектирования и разработки

**Библиографический список**

1. Development of a Membrane Distillation module for solar energy seawater desalination / A. Cipollina, M. G. Di Sparti, A. Tamburini, G. Micale // Chemical Engineering Research and Design. — 2012. — Vol. 90 (12). — P. 2101−2121. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.021

2. Многокритериальная оптимизация параметров газоструйных аппаратов / Т. А. Юсупов, В. М. Емельянов, А. М. Гумеров, А. И. Рудаков // Вестник Казанского технологического университета. — 2003. — №2. — С. 131–136.

3. Иванец, В. Н. Интенсификация процесса смешивания путем оптимизации конструкции аппарата / В. Н. Иванец, А. В. Сибиль // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. — 2010. — №4(316). — С. 66–67.

4. The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology / Jian-Yuan Lee, Wen See Tan, Jia An [et al.] // Journal of Membrane Science. — 2016. — Vol. 499. — P. 480–490. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008

5. Volfson, B. New Russian National Standards on Pressure Vessel and Apparatus Design and Strength Calculation / B. Volfson // Proc. ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference. Vol. 1: Codes and Standards. Prague, Czech Republic. — 2009. — P. 531–535. https://doi.org/10.1115/PVP2009-77840

6. Теоретические аспекты прогнозирования производительности баромембранных установок для разделения жидких полидисперсных систем / С. П. Бабенышев, С. А. Емельянов, В. Е. Жидков [и др]. // Научное обозрение. — 2012. — №5. — С. 468–470.

7. Кочетов, В. И. Оптимизация конструктивных параметров фланца электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа / В. И. Кочетов, В. Ю. Попов // Механики XXI веку. — 2012. — №11. — С. 92–96.

8. Kovaleva, O. Development and calculation of an electrobaromembrane apparatus for purifying process solutions / O. Kovaleva, S. Lazarev, S. Kovalev // Chemical and Petroleum Engineering. — 2017. — Vol. 53 (1/2). — P. 21–25. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0287-9

9. Improved design of an electrobaromembrane apparatus and calculation of the parameters of the housing chamber when subjected to the effect of excess pressure / V. I. Kochetov, S. I. Lazarev, S. V. Kovalev [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. — 2018. — Vol. 54 (1–2). — P. 82−86. https://doi.org/10.1007/s10556-018-0443-x

10. Flat-chamber electrobaromembrane apparatus with improved characteristics and its calculation method / S. I. Lazarev, S. V. Kovalev, O. A. Kovaleva [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. — 2019. — Vol. 55 (1–2). — P. 114−121. https://doi.org/10.1007/s10556-019-00590-0

[4] Эпоксидный композиционный материал (стеклопластик) производства фирмы ООО «Эволюшн Моторс» / Evomotors : [сайт]. URL : evolmotors.ru (дата обращения : 19.03.2021).

11. Gaydzhurov, P. P. Study of stress-strain states of a regular hinge-rod constructions with kinematically oriented shape change / Peter P. Gaydzhurov, Elvira R. Iskhakova, Nadezhda G. Tsaritova // International journal for computational civil and structural engineering. — 2020. — Vol. 16 (1). — P. 38–47. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-1-38-47

12. Соловьев, А. Н. Метод конечных элементов в моделировании центробежно-ротационной обработки / А. Н. Соловьев, М. А. Тамаркин, Н. В. Тхо // Advanced Engineering Research. — 2019. — Т.19, № 3. — С. 214–220. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220

13. Бояршинов, С. В. Основы строительной механики машин. Учебное пособие для студентов вузов / С. В. Бояршинов. — Москва: Машиностроение, 1973. — 456 с.

14. Геворкян, Р. С. Асимптотические решения связанных динамических задач термоупругости для анизотропных в плане неоднородных тороидальных оболочек / Р. С. Геворкян // World science. — 2016. — Т.1, №9 (13). — С. 14–29.

15. Легостаев, В. Л. Методика расчета торообразных оболочек по безмоментной и моментной теориям прочности / В. Л. Легостаев, Е. Д. Мордовин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2007. — Т. 13, № 3. — С. 795–801.

Поступила в редакцию 05.04.2021
Поступила после рецензирования 26.04.2021
Принята к публикации 30.04.2021

*Об авторах:*

**Лазарев Сергей Иванович**, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0746-5161 , sergey.lazarev.1962@mail.ru

**Ломакина Ольга Владимировна**, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), кандидат педагогических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6908-6055 , lomakinaolga@mail.ru

**Буланов Владимир Евгеньевич,** доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8973-7513, 0212wladimir@mail.ru

**Хорохорина Ирина Владимировна**, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, д.106), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8947-6181, geometry@mail.nnn.tstu.ru

*Заявленный вклад авторов:*

С. И. Лазарев — постановка цели и задачи исследования, обсуждение результатов. О. В. Ломакина — проведение обзора, выбор метода решения, подготовка текста. В. Е. Буланов — проведение расчетов, формирование выводов. И. В. Хорохорина — анализ результатов исследования, доработка текста окончательной версии.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

# МЕХАНИКА
# MECHANICS





УДК 539.42 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-133-142

## Конечно-элементное моделирование совместной работы оползня скольжения и защитного сооружения



**П. П. Гайджуров, Н. А. Савельева, В. А. Дьяченков**
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

***Введение.*** В рамках задачи о плоской деформации разработана конечно-элементная модель оползневого склона естественного залегания, позволяющая учитывать совместную работу оползня скольжения и защитного инженерного сооружения. Для учета физической нелинейности материала слоев склона использована модель Друкера-Прагера. Для активации кинематической нестабильности в расчетную схему введена упруго-вязкая прослойка, вдоль которой происходит скольжение оползневого слоя.
***Материалы и методы.*** Численные эксперименты выполнены с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical, в котором реализован метод конечных элементов в форме метода перемещений. Дискретизация склона выполнена на базе плоских четырех узловых конечных элементов PLANE42. Для моделирования смещения оползневого слоя относительно неподвижного основания применены комбинированные упруго-вязкие элементы COMBIN14.
***Результаты исследования.*** Формализована физически нелинейная модель оползневого склона естественного залегания, состоящая из основания, оползневого слоя и упруго-вязкой прослойки. Разработана инженерная методика анализа напряженно-деформированного состояния системы «склон-защитное сооружение» с учетом кинематической нестабильности оползневого слоя. Проведена серия вычислительных экспериментов.
***Обсуждение и заключение.*** На основании выполненных расчетов показано, что предлагаемая методика позволяет уточнить силовое воздействие оползневого слоя на защитное сооружение и, тем самым, повысить надежность оценки рисков при активизации оползневого процесса.

***Ключевые слова***: метод конечных элементов, модель Друкера-Прагера, моделирование оползневого процесса, противооползневые инженерные сооружения.

***Для цитирования**:* Гайждуров, П. П. Конечно-элементное моделирование совместной работы оползня скольжения и защитного сооружения / П. П. Гайждуров, Н. А. Савельева, В. А. Дьяченков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 133–142. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-133-142





## Finite element modeling of the joint action of flow slide and protective structure

**P. P. Gaidzhurov, N. A. Saveleva, V. A. Dyachenkov**
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

***Introduction.*** In the context of the problem of plane deformation, a finite-element model of a natural landslide slope is developed. It allows for the joint work of a flow slide and a protective engineering structure. The Drucker-Prager model is used to take into account the physical nonlinearity of the slope layer material. To activate the kinematic instability, a viscoelastic interlayer is introduced into the design scheme, along which the landslide layer slides.
***Materials and Methods.*** Numerical experiments were performed using the ANSYS Mechanical software package, which implements the finite element method in the form of the displacement method. Slope discretization is performed on the basis of PLANE42 flat four-node finite elements. To simulate the displacement of the landslide layer relative to the fixed base, the combined viscoelastic elements COMBIN14 were used.

***Results.*** A physically nonlinear model of a natural landslide slope consisting of a base, a landslide layer, and a viscoelastic interlayer, is formalized. An engineering technique for analyzing the stress-strain state of the "slope-protective structure" system has been developed, taking into account the kinematic instability of the landslide layer. A series of computational experiments was carried out.

***Discussion and Conclusion.*** Based on the calculations performed, it is shown that the proposed method enables to specify the force action of the landslide layer on the protective structure and, thereby, to increase the reliability of the risk assessment when activating the landslide process.

***Keywords*:** finite element method, Drucker-Prager model, landslide process simulation, landslide protection engineering structures.

***For citation:*** P. P. Gaidzhurov, N. A. Saveleva, V. A. Dyachenkov. Finite element modeling of the joint action of flow slide and protective structure. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 133–142. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-133-142

**Введение.** Проектирование противооползневых инженерных сооружений является одним из важнейших направлений в области строительной науки. Вместе с тем, численное моделирование устойчивости склонов естественного залегания связано с факторами неопределенности такими, как нестабильность физико-механических характеристик материала и вариативность траекторий разрушения.

В настоящее время для оценки устойчивости откосов используют различные варианты метода предельного равновесия и метод снижения сдвиговой прочности материала в сочетании с методом конечных элементов [1– 3]. Результатом расчета по методу предельного равновесия является геометрия «классической» круглоцилиндрической линии скольжения. Метод снижения прочности позволяет получить более полную информацию о поверхности скольжения для рассматриваемого оползневого участка.

Отдельно можно выделить направление исследования склоновых процессов, базирующееся на модели движения центров масс частиц, упруго взаимодействующих между собой и наклонной поверхностью [4]. Еще одним подходом, базирующимся на блочной кинематике, является так называемый метод разрывного анализа деформаций (в оригинале discontinuous deformation analysis DDA) [5]. Метод DDA имеет ограничения, касающиеся взаимодействия между смежными блоками. Суть этих ограничений состоит в невозможности взаимного проникновения блоков и отсутствии растягивающих напряжений между блоками. На рис. 1 (взят из [5]) приведена схема связи блоков, используемая в методе DDA для моделирования обвалов горных пород. На этом рисунке $k_x$, $k_y$ и $c_x$, $c_y$ — параметры жесткости и вязкости соответственно в направлении осей $X$ и $Y$.

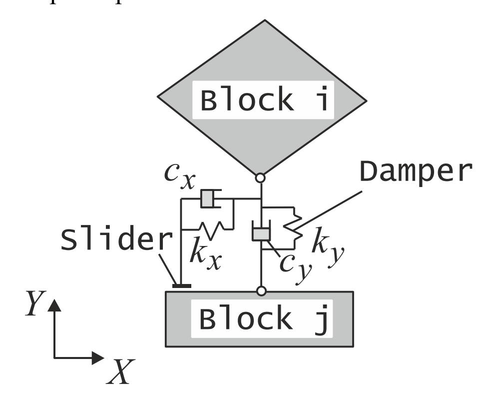



Рис. 1. Схема связи блоков для моделирования обвалов горных пород

Недостаток метода DDA состоит в отсутствии возможности введения в расчетную схему инженерных сооружений, препятствующих прогрессирующему разрушению горного массива.

Если после оценки устойчивости склона естественного залегания принимается решение о целесообразности возведения противооползневых сооружений, то в качестве исходной информации для проектирования используют данные инженерно-геологических изысканий, а также различные сценарии внешних силовых воздействий на участках оползневого склона. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния укрепленного оползневого склона выполняют, как правило, в двумерной постановке в рамках нелинейной теории упругости с помощью метода конечных элементов. Давление грунта полагается линейно-распределенным по глубине. Для инженерных геотехнических расчетов используют специализированные конечно-элементные программные комплексы: Plaxis, MIDAS GTS, GEO5, включающие наиболее распространенные модели грунта. Моделирование сложных геотехнических систем осуществляют на базе «тяжелого» программного комплекса ANSYS Mechanical [6].

Отметим, что в работах, посвященных анализу напряженно-деформированного состояния противооползневых сооружений отсутствуют сведения о применении моделей, учитывающих непосредственное скольжение (сползание) оползневого слоя. Обычно используются расчетные схемы, в которых обеспечивается совместное (безотрывное) деформирование всего грунтового массива, вплоть до потери несущей способности грунта. Это не позволяет в полной мере оценить силовое воздействие оползневого слоя на элементы конструкции.

**Материалы и методы.** Расчетная схема оползневого склона показана на рис. 2 (размеры указаны в метрах). Считаем, что склон состоит из двух слоев: $S_1$ — основание склона (плотная глина); $S_2$ — оползневой слой (переувлажненный суглинок). Полагаем, что положение линии скольжения известно. Внешнее воздействие представлено собственным весом оползневого слоя $S_2$ и равномерно распределенным давлением $q$.

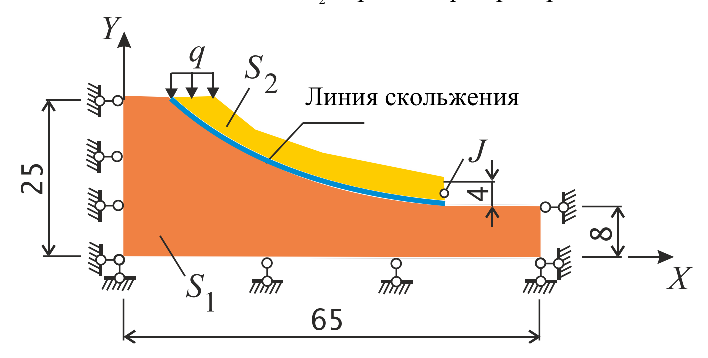



Рис. 2. Расчетная схема оползневого склона (размеры указаны в метрах)

Механические характеристики материалов слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1

Механические характеристики слоев склона

| Материал | Модуль деформации $E$, МПа | Коэффициент Пуассона $\nu$ | Угол внутреннего трения $\phi$, град | Сцепление $c$, кПа | Плотность $\rho$, кг/м$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| слой $S_1$ | 21 | 0,30 | 15 | 45 | 1702 |
| слой $S_2$ | 12 | 0,35 | 22 | 22 | 1800 |

Численное моделирование выполняем с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical. Конечно-элементная модель склона показана на рис. 3. Для моделирования грунта использованы двумерные 4-х узловые конечные элементы PLANE42. Причем сетки слоев $S_1$ и $S_2$ топологически не связаны, т. е. вдоль линии скольжения каждый узел имеет двойную нумерацию. Это необходимо для моделирования возможного смещения слоя $S_2$ относительно слоя $S_1$.

Для описания поведения слоев склона используем модель идеально упругопластического материала Друкера-Прагера [7], которая включена в комплекс ANSYS Mechanical. Уравнение поверхности текучести для данной модели имеет вид

$$F = \tau_i + 3\beta\sigma_m - \sigma_y = 0,$$

где $\tau_i$ — интенсивность касательных напряжений;

$\sigma_m$ — среднее напряжение;

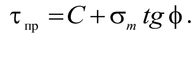
$\beta$, $\sigma_y$ — параметры модели, связанные с константами материала $C$ и $\phi$ соотношениями:

$$\beta = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}; \qquad \sigma_y = \frac{6C\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}.$$

Физическая зависимость, устанавливающая связь между напряжениями и деформациями, для идеально упругопластического материала описывается выражением [8]

$$\tau_i = \frac{G\gamma_i}{1+\gamma_i G/\tau_{\text{пр}}},$$

где $\gamma_i$ — интенсивность деформаций сдвига; $G$ — модуль сдвига; касательное напряжение, соответствующее пределу прочности материала (рис. 4)



$$\tau_{\text{пр}} = C + \sigma_m \, tg\,\phi.$$

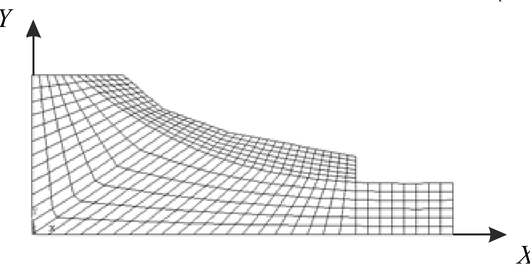



Рис. 3. Конечно-элементная модель склона

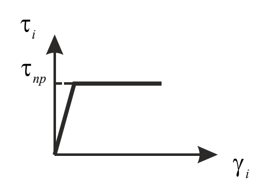



Рис. 4. График $\tau_i \sim \gamma_i$

Эффект возможного скольжения слоя $S_2$ относительно слоя $S_1$ моделируем с помощью комбинированных элементов пружинного типа COMBIN14 (рис. 5).

Уравнение равновесия для пружинного КЭ имеет вид

$$[h]\{u\} = \{p\},$$

где $[h]$ — матрица жесткости; $\{u\}$, $\{p\}$ — векторы столбцы узловых перемещений и сил. В зависимости от ориентации пружинного элемента имеем:

— локальная ось КЭ $\xi$ совпадает с осью $x$

$$[h] = k_x \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \qquad \{u\} = \{u_{ix}\ 0\ u_{jx}\ 0\}^T; \qquad \{p\} = \{p_{ix}\ 0\ p_{jx}\ 0\}^T.$$

— локальная ось КЭ $\xi$ совпадает с осью $y$

$$[h] = k_y \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \qquad \{u\} = \{0\ u_{iy}\ 0\ u_{jy}\}^T; \qquad \{p\} = \{0\ p_{iy}\ 0\ p_{jy}\}^T.$$

Здесь $k_y$, $k_x$ — коэффициенты жесткости, соответствующие ориентациям пружины вдоль осей $x$ и $y$; $T$ — символ операции транспонирования.

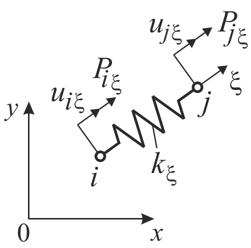



Рис. 5. Комбинированный конечный элемент COMBIN14

Принимаем следующие значения коэффициентов упругости:

$k_y$ = 21 Н/м, $k_x$ = 100 Н/м.

Параметры вязкости: $c_x = c_y$ = 0,5 Н·с/м.

При назначении коэффициентов $k_y$ и $k_x$ преследовалась цель приблизить модель рассматриваемого склона к реальности. В частности, вдоль линии скольжения учесть сопротивление деформации сдвига и упругий отпор слоя $S_2$. Аналогичный подход к моделированию эффекта «проскальзывания» использован в [9]. Отметим, что в принятой дискретизации слоев узлы $i$ и $j$, принадлежащие пружинным элементам, совпадают.

Расчетная нагрузка включает собственный вес слоя $S_2$ и равномерно распределенное усилие $q$, прикладываемое к верхнему торцу слоя $S_2$ (рис. 2).

Для организации вычислительного процесса используем нелинейный «решатель» комплекса ANSYS Mechanical, в котором реализован метод Ньютона-Рафсона.

Для верификации конечно-элементной модели выполним оценку устойчивости рассматриваемого склона, исключив из расчетной схемы элементы COMBIN14 и получив, таким образом, неослабленную модель. Расчетным путем установлено, что для неослабленного склона предельное значение давления $q$, при заданных механических характеристиках слоев $S_1$ и $S_2$, составляет 400 кПа. Процесс работы нелинейного решателя отражен в виде графика на рис. 6. Здесь вдоль оси абсцисс откладывается общее число итераций на каждом шаге «Time» нагружения, по оси ординат соответствующие нормы невязки усилий «F» и перемещений «U». Параметр «Time» изменяется в диапазоне от 0 до 1. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока значения «F»–«L2» меньше величин «F»–«CRIT». Пересечение пика пилообразной линии «F»–«L2» и кривой «F»–«CRIT» свидетельствует о том, что в данном примере итерационный процесс «сошелся» с заданной точностью.

На рис. 7 приведена картина распределения горизонтальных перемещений $u_x$ в теле неослабленного склона при $q$ =400 кПа. Как следует из рисунка, потеря устойчивости склона носит локальный характер. При этом отчетливо прослеживается круглоцилиндрический вид линии скольжения. Соответствующее распределения поля интенсивности пластических деформаций сдвига $\gamma_i$ показано на рис. 8.

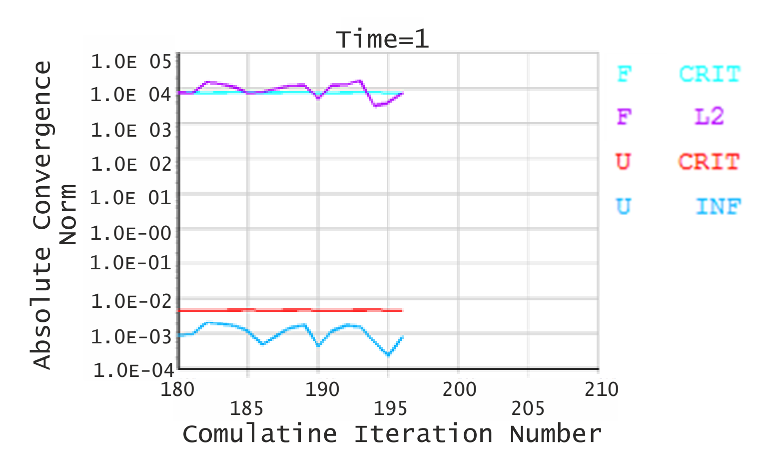



Рис. 8. График сходимости процедуры Ньютона-Рафсона

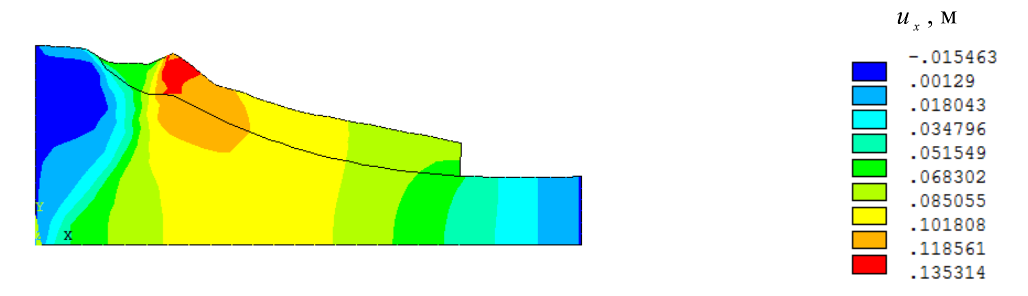



Рис. 7. Визуализация перемещений $u_x$ при $q$ =400 кПа

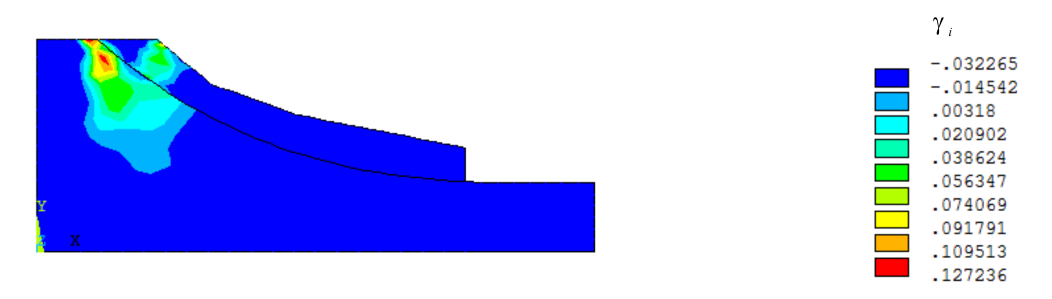



Рис. 8. Визуализация распределения $\gamma_i$ при $q$ =400 кПа

**Результаты исследования.** С целью моделирования эффекта кинематической неустойчивости оползневого слоя $S_2$ выполним анализ напряженно-деформированного состояния склона с учетом ослабления при различных значениях давления $q$. Подчеркнем, что в этом случае элементы COMBIN14 включены. На рис. 9 представлен график $u_x \sim q$, где $u_x$ — горизонтальное перемещение точки $J$ «языка» оползневого слоя $S_2$ (рис. 2).

Сопоставляя результаты расчетов для ослабленного и неослабленного склонов, приходим к выводу, что включение в расчетную модель слоя скольжения существенно (более, чем на один порядок) снижает предельное значение $q$.

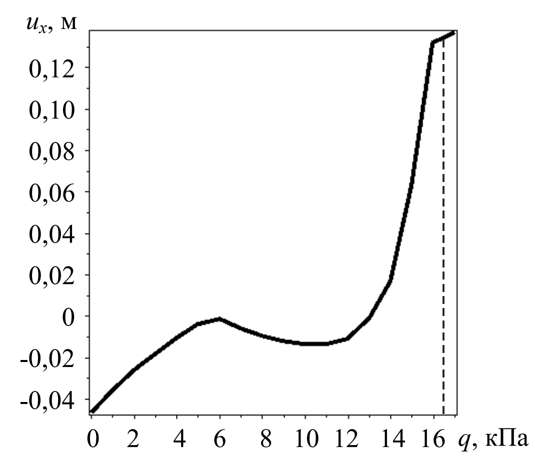



Рис. 9. График зависимости горизонтального перемещения точки $J$ «языка» оползневого слоя $S_2$ от значения давления $q$

Из графика $u_x \sim q$ видно, что для рассматриваемой модели склона оползневой процесс имеет явно выраженный нелинейный характер. Причем в диапазоне давлений от 6 кПа до 11 кПа наблюдается смещение «языка» слоя $S_2$ в направлении, обратном ожидаемому оползневому процессу. На рис. 10 показана контрастная картина распределения поля перемещений в направлении оси *x*, соответствующая нагружению слоя $S_2$ давлением $q$ =16,5 кПа.

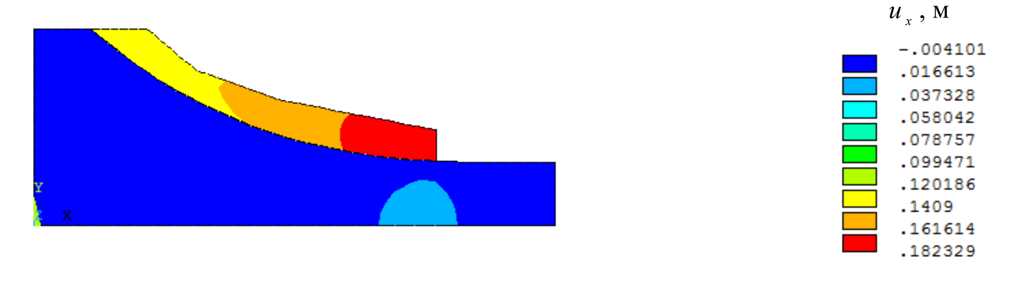



Рис. 10. Визуализация перемещений $u_x$ при $q$ =16,5 кПа

Фрагмент конечно-элементной модели «языка» оползня в деформированном состоянии при $q$ =16,5 кПа представлен на рис. 11.

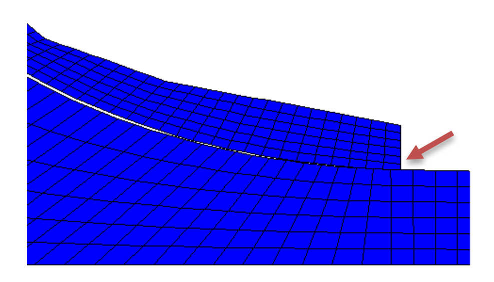


Рис. 11. Визуализация конечно-элементной модели фрагмента склона в деформированном состоянии при $q$ =16,5 кПа

Как видно из рис. 11, предлагаемая методика позволяет моделировать эффект скольжения слоя $S_2$ относительно слоя $S_1$. Данный эффект проявляется в относительном смещении узлов сетки (показано стрелкой). Величина максимального относительного смещения $u_{x\max}$ достигает 18,2 см, что с физической точки зрения вполне соответствует началу оползневого процесса.

На рис. 12 представлены рассматриваемые варианты схем противооползневых сооружений, выполненных из бетона. Приняты механические константы для бетона $E_б = 3{\cdot}10^4$ МПа; $\nu_б = 0{,}2$; $\rho_б = 2446$ кг/м$^3$. Расчетное значение высоты защитных сооружений $h$ =2,6 м. Заглубление свайного основания 8 м (схемы *б* и *в*). Значение давления $q$ = 16,5 кПа.

Свайное основание (схема *б*) и шпунтовое ограждение (схема *в*) представлены 2-х узловыми балочными элементами BEAM3. Диаметр свай принят равным 0,35 м.

Визуализация рассматриваемых схем противооползневых сооружений в деформированном состоянии показана на рис. 13. Из приведенных данных следует, что при моделировании оползневого процесса происходит вдавливание «языка» слоя $S_2$ в основание $S_1$. Этим объясняется «заваливание» противооползневых сооружений навстречу движению слоя $S_2$.

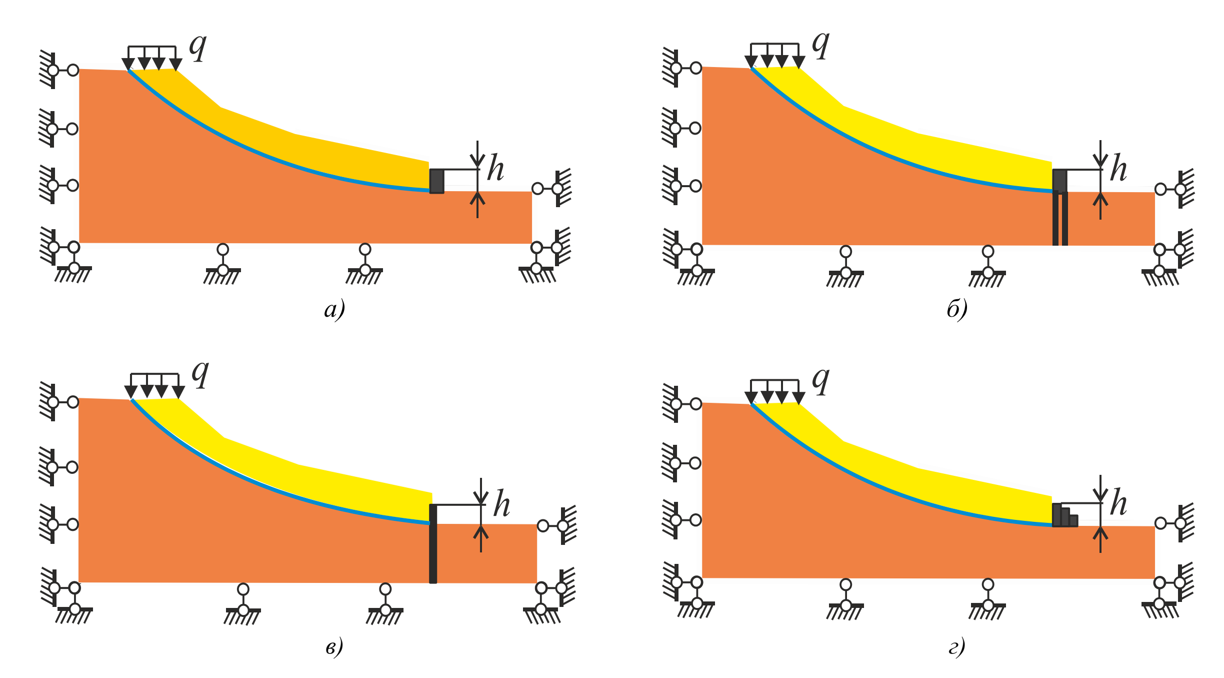



Рис. 12. Схемы противооползневых сооружений:
*а* — подпорная стенка, *б* — подпорная стенка на свайном основании, *в* — шпунтовое ограждение, *г* — габион

Графики изменения горизонтальных перемещений $u_x$ и напряжений $\sigma_x$ по высоте $h$ рассматриваемых защитных сооружений приведены на рис. 14.

Анализируя представленные результаты, приходим к выводу, что наиболее выраженным с инженерной точки зрения противооползневым эффектом обладает схема *б*, обеспечивающая относительно однородное горизонтальное смещение подпорной стенки без «заваливания». При этом максимальное горизонтальное смещение стенки составляет 16 мм. Для усиления надежности данной конструкции можно применить анкерные

связи [10].

Определенный практический интерес при проектировании противооползневых сооружений представляет характер распределения внутренних усилий в свайном основании. Для схемы *б* эпюры изгибающих моментов $M$, возникающих в левой и правой сваях, представлены на рис. 15. Значение максимального нормального напряжения сжатия при изгибе для схемы *б* составило $\sigma_{max}$ = 337кН/м$^2$, что значительно меньше предела прочности бетона при сжатии (25,5 МПа).

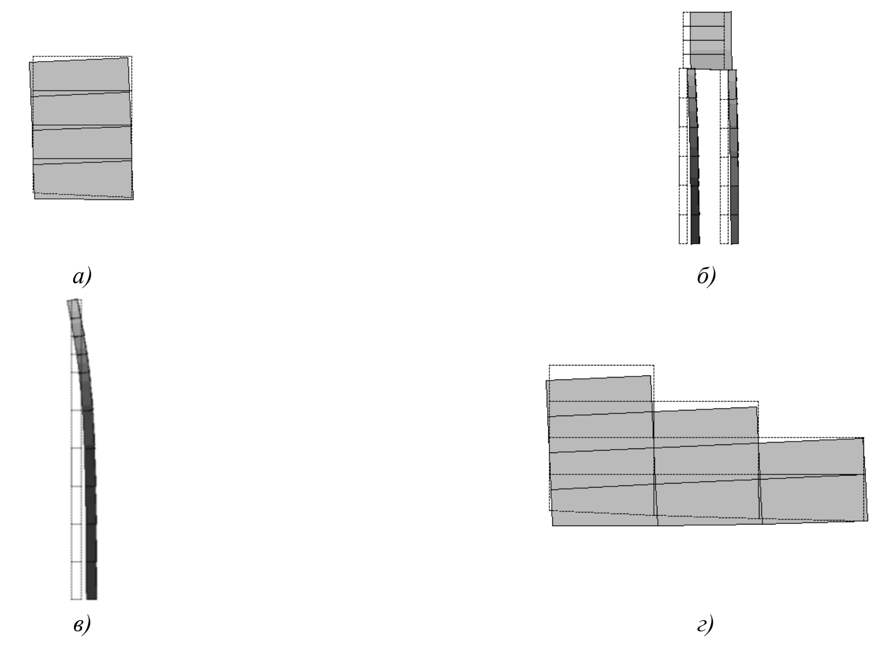



Рис. 13. Визуализация защитных сооружений в деформированном состоянии:
*а* — подпорная стенка, *б* — подпорная стенка на свайном основании,
*в* — шпунтовое ограждение, *г* — габион

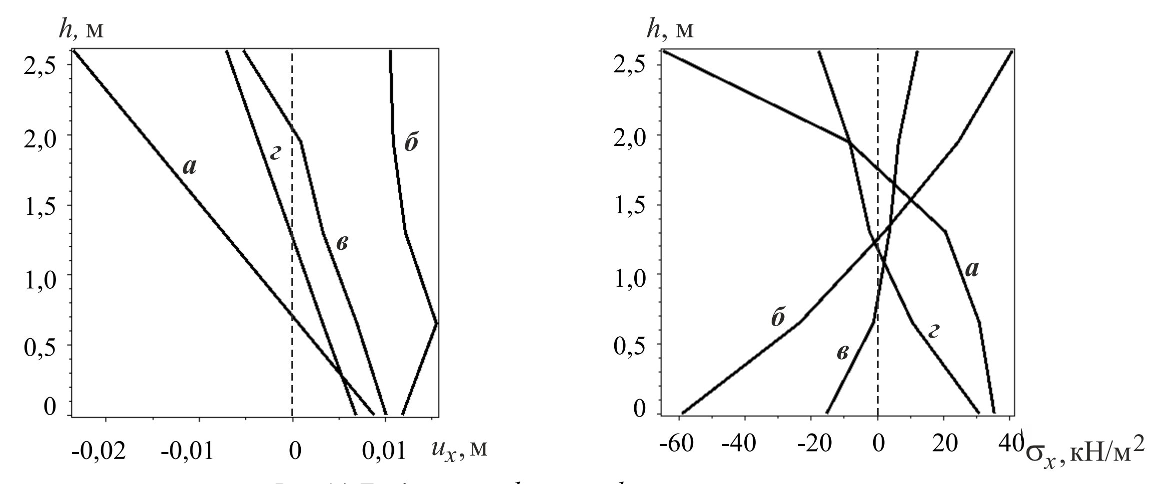



Рис. 14. Графики $u_x \sim h$ и $\sigma_x \sim h$ для защитных сооружений:
*а* — подпорная стенка; *б* — подпорная стенка на свайном основании;
*в* — шпунтовое ограждение; *г* — габион

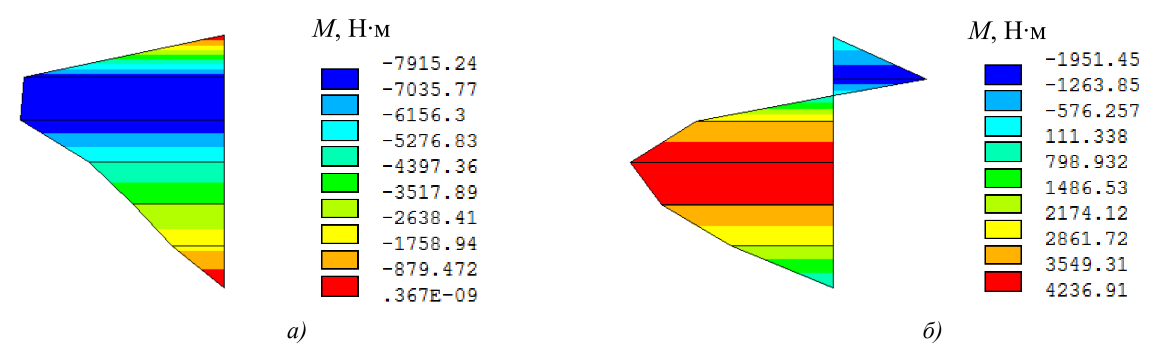



Рис. 15. Эпюры изгибающих моментов в сваях схемы 6 на рис. 12:
*а* — левая свая; *б* — правая свая

Эпюры поперечных сил $Q$ в сваях приведены на рис. 16.

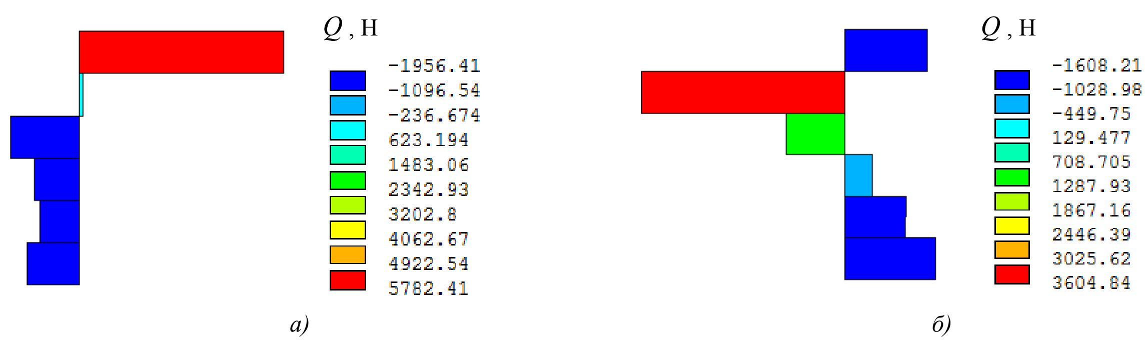



Рис. 16. Эпюры поперечных сил в сваях схемы 6 на рис. 12:
*а* — левая свая; *б* — правая свая

Из рис. 16 видно, что сечение возможного среза свай располагается ниже нулевой отметки сооружения.

**Обсуждение и заключения.** В рамках задачи о плоской деформации построена конечно-элементная модель, имитирующая оползневой процесс склона естественного залегания. В отличие от существующих методик расчета противооползневых сооружений, в данном подходе реализована концепция кинематической неустойчивости оползневого слоя, суть которой состоит в применении вдоль предполагаемой линии скольжения комбинированных конечных элементов. На серии численных экспериментов выполнена апробация предлагаемой методики исследования взаимодействия оползня скольжения с различными вариантами защитных сооружений. Установлено, что наиболее эффективную противооползневую защиту при заданных геометрических и физических параметрах обеспечивает комбинированное сооружение, состоящее из подпорной стенки и свайного основания.

**Библиографический список**

1. Seyed-Kolbadi, S. M. An improved strength reduction-based slope stability analysis / S. M. Seyed-Kolbadi, J. Sadoghi-Yazdi, M. A. Hariri-Ardebili // Geosciences. — 2019. — Vol. 9 (1). — P. 55. https://doi.org/10.3390/geosciences9010055

2. Griffiths, D. V. Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements / D. V. Griffiths, R. M. Marquez // Geotechnique. — 2007. — Vol. 57 (6). — P. 537–546. https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.537

3. Jing Xi Chen. Slope stability analysis by strength reduction elasto-plastic FEM / Jing Xi Chen, Peng Zhen Ke, Guang Zhang // Key Eng. Mater. — 2007. — Vol. 345. — P. 625–628. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.345-346.625

4. Михайлов, В. О. Трехмерная математическая модель обвальных процессов / В. О. Михайлов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2011. — № 4. — С. 53–58.

5. Yossef H. Hatzor. Discontinuous deformation analysis in rock mechanics practice / Yossef H. Hatzor, Guowei Ma, Gen-hua Shi // ISRM, CRC Press, 2018. — 410 p.

6. Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муземенек, А. С. Шадский. — Москва : ЛЕНАНД, 2008. — 456 с.

7. Drucker, D. C. Soil Mechanics and plastic analysis or limit design / D.C. Drucker, W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics. — 1952. — Vol. 10 (2). — P. 157−165.

8. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев — Москва : Недра, 1987. — 221 с.

9. Гайджуров, П. П. Конечно-элементное моделирование передачи усилия натяжения стального каната на бетон / П. П. Гайджуров, Аль-Джабоби Сами Фахль, Аль-Хадж Махмуд Абдо Хаса // Известия вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 73–78.

10. Маций, С. И. Свайно-анкерные противооползневые конструкции / С. И. Маций, А. К. Рябухин. — Краснодар : КубГАУ, 2017. — 189 с.

Поступила в редакцию 10.03.2021
Поступила после рецензирования 08.04.2021
Принята к публикации 13.04.2021

*Об авторах:*

**Гайджуров Петр Павлович**, профессор кафедры «Техническая механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3913-9694, gpp-161@yandex.ru

**Савельева Нина Александровна**, старший преподаватель кафедры «Техническая механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID https://orcid.org/0000-0002-8702-5168, ninasav86@mail.ru

**Дьяченков Владимир Александрович**, магистрант кафедры «Техническая механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), snowflash88@gmail.com

*Заявленный вклад соавторов:*

П. П. Гайджуров — постановка задачи, обсуждение результатов. Н. А. Савельева — проведение обзора, выбор метода решения построения, математической и компьютерной модели, проведение расчетов, обсуждение результатов. В. Д. Дьяченков — обсуждение результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

# МЕХАНИКА
# MECHANICS





УДК 004.85 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-143-153

## Визуализация внутренних дефектов с применением глубокой генеративной нейросетевой модели и ультразвукового неразрушающего контроля



**П. В. Васильев[1], А. В. Сеничев[1], И. Джорджо[2]**
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]Университет Л'Акуилы, (г. Л'Акуила, Италия)

***Введение.*** Развитие методов машинного обучения дало новый толчок в области решения обратных задач механики. Многие работы показывают, что наряду с хорошо зарекомендовавшими себя техниками ультразвукового, магнитного, теплового неразрушающего контроля, применяются новейшие методы, в том числе на основе нейросетевых моделей. В данной работе продемонстрирован потенциал применения методов машинного обучения в задаче двумерной ультразвуковой визуализации.
***Материалы и методы.*** Авторами построена тестовая модель акустического ультразвукового неразрушающего контроля, в которой происходит зондирование исследуемого объекта с последующей фиксацией сигналов-откликов. Распространение ультразвуковой волны моделируется методом конечных разностей во временной области. На вход сверточной нейронной сети подается ультразвуковой сигнал, полученный во внутренних точках объекта контроля. На выходе генерируется изображение, визуализирующее внутренний дефект.
***Результаты исследования.*** В ходе проведенного комплекса численных экспериментов был создан набор данных, предназначенный для обучения сверточной нейронной сети. Представлена сверточная нейросетевая модель, разработанная для решения задачи визуализации внутренних дефектов на основе методов ультразвукового неразрушающего контроля. Данная модель имеет небольшой размер, который составляет 3,8 миллиона параметров. Её простота и универсальность обеспечивают высокую скорость обучения и широкие возможности применения в классе смежных задач. Представленные результаты показывают высокую степень информативности ультразвукового отклика и его соответствия реальной форме внутреннего дефекта, находящегося внутри объекта контроля. Исследовано влияние геометрических параметров дефектов на точность работы нейросетевой модели.
***Обсуждение и заключение.*** На основе полученных результатов выявлено, что предлагаемая модель показывает высокую точность работы (F1 > 0,95) в случаях, когда длина волны зондирующего импульса в десятки раз меньше размера дефекта. Авторы полагают, что комбинация предложенных методов в данном подходе может послужить хорошей отправной точкой для будущих исследований в области решения задач дефектоскопии и обратных задач в целом.

***Ключевые слова***: ультразвуковой неразрушающий контроль, дефект, ультразвуковой отклик, сверточные нейронные сети.

***Для цитирования:*** Васильев, П. В. Визуализация внутренних дефектов с применением глубокой генеративной нейросетевой модели и ультразвукового неразрушающего контроля / П. В. Васильев, А. В. Сеничев, И. Джорджо // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 143–153. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-143-153

***Финансирование:*** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов №19-08-00074А и №20-31-90026





# Visualization of internal defects using a deep generative neural network model and ultrasonic nondestructive testing

**P. V. Vasiliev**[1], **A. V. Senichev**[1], **I. Giorgio**[2]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Università degli Studi dell'Aquila (L'Aquila, Italy)

***Introduction.*** The development of machine learning methods has given a new impulse to solving inverse problems in mechanics. Many studies show that along with well-behaved techniques of ultrasonic, magnetic, and thermal nondestructive testing, the latest methods are used, including those based on neural network models. In this paper, we demonstrate the potential application of machine learning methods in the problem of two-dimensional ultrasound imaging.
***Materials and Methods.*** We have developed an experimental model of acoustic ultrasonic non-destructive testing, in which the probing of the object under study takes place, followed by the recording of the response signals. The propagation of an ultrasonic wave is modeled by the finite difference method in the time domain. An ultrasonic signal received at the internal points of the control object is applied to the input of the convolutional neural network. At the output, an image that visualizes the internal defect is generated.
***Results.*** In the course of the performed complex of numerical experiments, a data set was generated for training a convolutional neural network. A convolutional neural network model, which is developed to solve the problem of visualizing internal defects based on methods of ultrasonic nondestructive testing, is presented. This model has a small size, which is 3.8 million parameters. Its simplicity and versatility provide high-speed learning and a wide range of applications in the class of related problems. The presented results show a high degree of information content of the ultrasonic response and its correspondence to the real form of an internal defect located inside the test object. The effect of geometric parameters of defects on the accuracy of the neural network model is investigated.
***Discussion and Conclusion.*** The results obtained have established that the proposed model shows a high operating accuracy (F1 > 0.95) in cases when the wavelength of the probe pulse is tens of times less than the size of the defect. We believe that the combination of the proposed methods in this approach can serve as a good starting point for future research in solving flaw defection problems and inverse problems in general.

***Keywords:*** ultrasonic nondestructive testing, defect, ultrasonic response, convolutional neural networks.

***Funding information:*** the research is done with the financial support from RFFI within the framework of projects nos. 19-08-00074A and 20-31-90026.

***For citation:*** P. V. Vasiliev, A. V. Senichev, I. Giorgio. Visualization of internal defects using a deep generative neural network model and ultrasonic nondestructive testing. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 143–153. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-143-153

**Введение.** В данной работе авторы исследуют возможности применения нейросетевых технологий в решении обратных задач механики, в частности, в задаче двумерной визуализации внутренних дефектов. Данные методы получили широкое распространение в медицине, гражданской инженерии, неразрушающем контроле и других областях.

Так в работе [1] была разработана система для обнаружения трещин в стальных конструкциях и оценки их глубины на основе двумерных изображений. Цель работы заключается в том, чтобы разработать доступную и удобную для пользователя систему контроля взамен дорогостоящих измерительных устройств. Была предложена стратегия обучения и несколько нейросетевых структур. В процессе обучения средняя интенсивность профилей двумерных стальных трещин подавалась в нейронную сеть вместе с максимальной глубиной стальных трещин, измеренной с помощью лазерного микроскопа. Средняя ошибка работы нейронной сети составляет 18 % на тестовой выборке, что лучше, в сравнении с предыдущими работами авторов. Улучшение качества определения глубины дефектов достигается за счет применения новой стратегии обучения и инструмента оценки глубины трещин.

В работе [2] были предложены некоторые методы глубокого обучения для выявления дефектов в изображениях, полученных с помощью неразрушающего контроля. Для применения таких подходов нужны размеченные данные изображений с дефектами. Авторы предлагают модель обучения с глубоким переносом для извлечения признаков внутренних дефектов на рентгеновских изображениях композитных материалов авиационной отрасли. Исследовали метод автоматического обнаружения дефектов включения на рентгеновских изображениях, используя предложенную модель. Экспериментальные результаты показывают, что модель

может достичь точности классификации 96 % (по метрике F1) с удовлетворительными результатами обнаружения.

В работе [3] предлагается метод реконструкции и визуализации внутренних дефектов в виде трехмерного изображения с использованием экономичной и быстрой технологии импульсной термографии. Представлен новый метод быстрой оценки глубины и толщины дефекта одновременно на основе одной односторонней проверки. Осуществимость и эффективность предложенного решения демонстрируется путем осмотра композитного и стального образцов с полузакрытыми воздушными зазорами. Для композитного образца этот метод может обеспечить сравнительно низкую, в пределах 10%, среднюю относительную ошибку оцененного общего объема 3D-дефектов.

В работе [4] рассматриваются основные причины отказов двигателей твердотопливных ракет. Отслаивания на границе раздела пропеллент/гильза/изоляция являются критическим моментом для целостности двигателей. Современные решения обычно ограничиваются методами оценки целостности конструкции ракетных двигателей и визуального контроля их компонентов.

В данной статье представлен улучшенный алгоритм обнаружения дефектов поверхности гильзы, которые могут нарушить связь между твердым ракетным топливом и изоляцией. Использование локальных двоичных шаблонов (LBP) обеспечивает структурный и статистический подход к анализу текстуры образцов изображений двигателя. Нейронная сеть анализирует образцы изображений двигателя и классифицирует каждый пиксель на один из трех классов: исправный, посторонний объект и дефект. Было проведено несколько тестов с варьированием различных параметров для того, чтобы найти оптимальную конфигурацию нейронной сети. В результате для соответствующих классов была достигнута лучшая точность классификации: 99,08 %, 90,66 % и 99,48 %.

В работе [5] представлен краткий обзор алгоритмов искусственного интеллекта, применимых к неразрушающему контролю. Он ориентирован на два метода: искусственные нейронные сети и нечеткую логику. Приведены избранные примеры применения этих методов в цифровой рентгенографии и вихретоковом методе.

В работе [6] автор исследует потенциал методов глубокого обучения для электромагнитной инверсии. Этот подход не требует расчета градиента и сразу после обучения сети дает результаты. Глубокие нейронные сети, основанные на полностью сверточной архитектуре, обучаются на больших наборах синтетических данных, полученных с помощью полного трехмерного моделирования. Эффективность метода демонстрируется на моделях, имеющих большое практическое значение, представляющих сценарий мониторинга электромагнитного поля скопления углекислого газа под землей с контролируемым источником на поверхности.

Ранее авторами были исследованы некоторые задачи, объединяющие современные методы глубокого машинного обучения и хорошо зарекомендовавшие себя классические подходы идентификации дефектов [7–9].

В этой работе в качестве пилотного исследования рассматривается нейросетевая модель, на основе которой проводится двумерная акустическая визуализация внутренних дефектов. Построена пробная модель неразрушающего ультразвукового контроля, на основе которой проводится комплекс численных экспериментов. Результаты этих экспериментов служат основой для обучения нейронной сети и её валидации.

**Материалы и методы.** Предлагается метод идентификации и визуализации внутренних дефектов, основанный на ультразвуковом неразрушающего контроле и генеративной нейросетевой модели. На вход сверточной нейронной сети подается ультразвуковой сигнал, полученный во внутренних точках объекта контроля. На выходе генерируется изображение, визуализирующее внутренний дефект. В качестве объекта для демонстрации возможности и перспектив развития данного метода исследования была выбрана внутренняя часть стальной пластины. Внутри полосы может находиться дефект, обозначенный отсутствием материала. Форма, размер и ориентация дефекта могут быть различными. Подход заключается в проведении ряда численных экспериментов, на основе которых возможно обучить глубокую нейросетевую модель. Путем варьирования геометрических параметров дефекта и моделирования распространения акустической ультразвуковой волны для каждого случая создается обучающий набор. На основе собранных данных возможно построить оптимальную структуру нейросетевой модели и обучить её.

**Метод конечных разностей во временной области.** Данный метод был предложен Кейном Йи [10] и относится к классу сеточных методов решения дифференциальных уравнений. В настоящий момент данный метод нашел широкое применение — от задач геофизики до решения задач в оптическом диапазоне, а также в ряде задач моделирования сред как с дисперсными, так и нелинейными свойствами, Метод конечных разностей во временной области в акустической постановке применяется для проведения моделирования распространения звука в текучих средах, таких как воздух или жидкости. Однако в некоторых случаях для упрощения решения

задач этот метод возможно применять и в упругих средах. В рамках данного метода скорость и акустическое давление частиц моделируемого объекта располагаются поочередно в узлах сетки. Затем их значения рассчитываются последовательно, что позволяет в течение времени провести расчет распространения звукового поля.

Основным уравнением данной акустической модели в плоской постановке является следующее:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -k\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}\right) \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}, \qquad \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y},$$

где $p$ — это давление, $v$ — скорость, $k$ — объемный модуль упругости, $\rho$ — плотность среды.

Величины пространственного $\Delta x$ и временного $\Delta y$ разрешений влияют на то, как точно и устойчиво будет рассчитано акустическое поле. Эти величины не могут быть установлены независимо и должны выбираться с учетом друг друга.

Прежде всего, нужно установить значение $\Delta x$ исходя из соображений точности. При этом точность и устойчивость независимы друг от друга. Моделирование может проходить устойчиво, но с низкой точностью в случае грубой сетки. Точность решения данным методом зависит от многих факторов. В данном случае величины $\Delta x$ и $\Delta y$ могут быть установлены как:

$$\Delta x = \frac{\lambda_{min}}{10} \sim \frac{\lambda_{min}}{20}, \Delta t \le \frac{1}{\sqrt{d}}\frac{\Delta x}{c_{max}},$$

где, $\lambda_{min}$ — длина волны, которая распространяется в моделируемом пространстве, $c_{max}$ — наибольшее значение скорости звука в моделируемой среде, $d$ — значение размерности, для плоской задачи $d = 2$.

Построена эталонная модель распространения акустической ультразвуковой волны в пакете COMSOL. Соответственно решение осуществляется методом конечных элементов и методом конечных разностей. Ниже на рис. 1 показаны нормированные значения акустического давления, считанные в точке модели. Модель представляет собой квадратную область, выполненную из стали с отверстием внутри. Небольшие отличия в форме сигнала обусловлены способом задания источника ультразвуковых колебаний. В случае FEM — точки на окружности, в случае FDTD — точка в узле сетки.

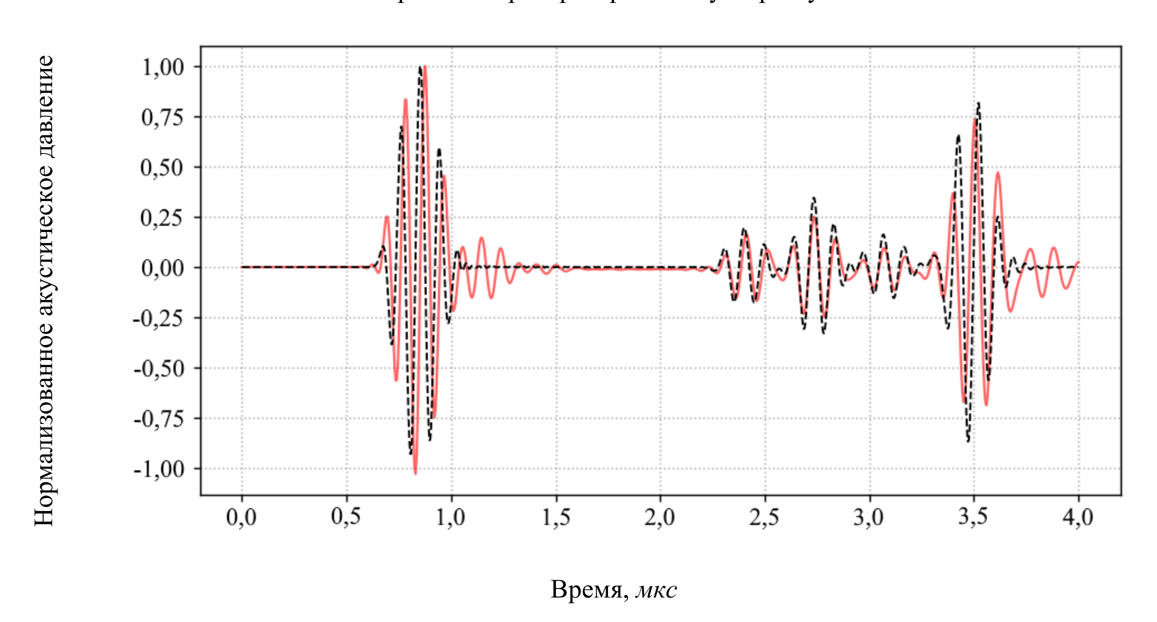



Рис. 1. Форма прямого и отраженного ультразвукового сигнала. Штриховой линией показаны значения, рассчитанные с помощью метода FDTD, сплошной — с помощью метода конечных элементов

Так как сетка имеет ограниченный размер, нет возможности проводить моделирование распространения акустических волн за пределами этой области, поэтому применяются специальные граничные условия. Применяются поглощающие слои Мура или идеально согласованные слои (Perfect Matched Layers, PML [11]). Данные условия существенно снижают отражающую способность границ области, в которой происходит моделирование и создают эффект прохождения волн за границы этой области.

**Модель неразрушающего контроля.** В качестве пробной модели неразрушающего контроля выбрана внутренняя часть стальной пластины, содержащая дефект. Размер исследуемой области 20×20 мм. Дефекты представлены в виде геометрических фигур: эллипса, треугольника, квадрата, прямоугольника. Физические параметры дефектов варьируются относительно моделируемой области в следующих пределах: положение

дефекта — от 0,3 до 0,7; размер дефекта — от 0,1 до 0,35; угол наклона дефекта — от 0° до 360°. Входной сигнал состоит из фиксированного количества дискретных значений, заданных временем эксперимента. Время эксперимента выбрано таким образом, чтобы зондирующий импульс, отразившись от дефекта, смог преодолеть расстояние и вернуться в точку инициирующего сигнала. Частота зондирующего импульса составляет 10 МГц.

На рис. 2 показана схема проводимого численного эксперимента. Дефект расположен в центре зондируемой области с заданным смещением. Источник ультразвукового сигнала показан красной меткой. Точки считывания сигнала показаны зелеными метками. Прерывистой линией показаны границы дефекта.

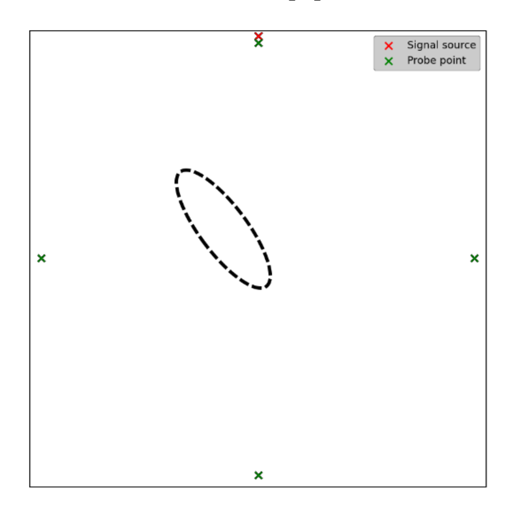



Рис. 2. Схема одного из проведенных численных экспериментов

Модель позволяет оценить возможность применения предлагаемого метода и дальнейшие перспективы его использования. Ультразвуковой сигнал задается во внутренней точке объекта контроля. Точки, имитирующие датчики, считывающие проходящий и отраженный сигналы, расположены по разные стороны от предполагаемого места локации дефекта. Такая виртуальная модель позволяет оценить влияние некоторых параметров эксперимента на качество работы нейронной сети. На основе реализованного подхода возможно построение моделей, отражающих реальные технические задачи. На рис. 3 показано распространение и отражение ультразвуковой волны от дефекта внутри исследуемой области.

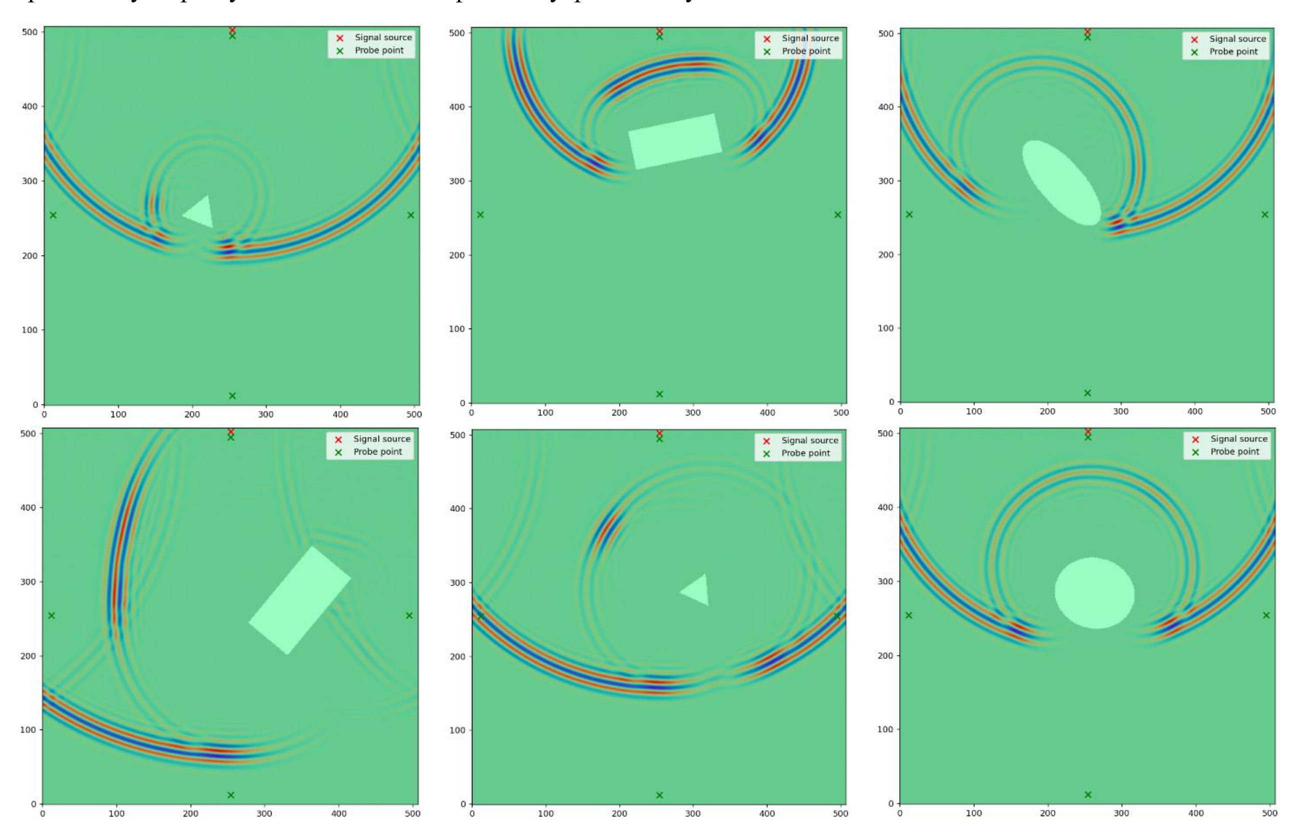



Рис. 3. Распространение ультразвуковой волны и её отражение от различных дефектов

**Нейросетевая модель.** Сверточные нейронные сети (СНН) — это особый нейросетевой инструмент для обработки данных, имеющих сеточную структуру (двумерные изображения, одномерные сигналы) [12]. На данный момент это один из самых бурно развивающихся и перспективных инструментов глубокого обучения [13–15].

Они также оказались чрезвычайно успешными в других практических применениях, включая видеоанализ и обработку данных временных рядов (последнюю можно рассматривать как одномерную сетку, обрабатывающую образцы через фиксированные промежутки времени). СНН — это ключевой пример успешного применения идей, полученных при изучении мозга (в некоторой степени вдохновленных структурой зрительной системы млекопитающих). Как видно из названия, сверточная сеть использует операцию свертки, то есть фильтрацию с помощью карты признаков или ядра, вместо общего умножения матриц в полносвязных сетях (фактически, свертка соответствует произведению на разреженную матрицу).

Для решения задачи визуализации дефектов авторы предлагают использовать сверточную нейросетевую модель. На вход модели подается ультразвуковой сигнал, полученный во внутренних точках объекта контроля. На выходе генерируется изображение с предполагаемой формой, положением и ориентацией дефекта. Входной сигнал проходит слои одномерной свертки (Conv1D) и субдискретизации (MaxPooling). После чего данные попадают на полносвязный слой. Эта сверточная часть сети служит для выделения признаков из сигнала, на основе которых будет происходить визуализация дефекта. Вторая часть сети генерирует изображения, соответствующие форме, положению и ориентации дефекта. Данные из полносвязного слоя проходят трансформацию и отображаются на двумерный слой. Из этого слоя, пройдя через ряд обучаемых разверточных слоев (Conv2D Transpose), получается финальное изображение, которое визуализирует внутренний дефект. Модель сверточной нейронной сети, используемой в данной работе, представлена на рис. 4. Под каждым слоем показан размер входных данных и количество ядер свертки. Например, 504×32 означает, что на этот слой подается 504 значения и к ним применяются 32 различных свёрточных фильтра.

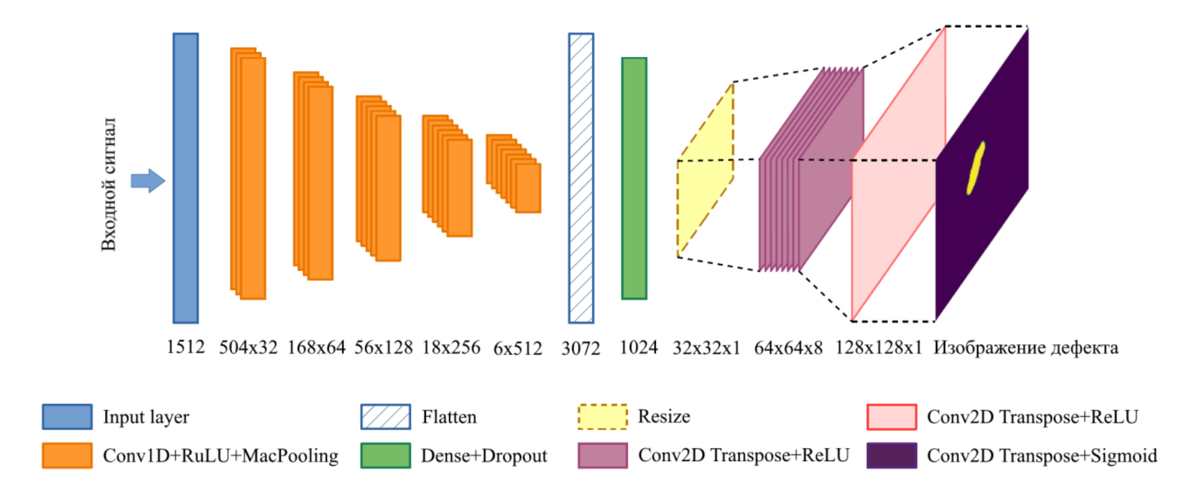



Рис. 4. Схема архитектуры свёрточной нейронной сети

**Обучение и валидация модели.** В рамках комплекса численных экспериментов было решено 17 000 задач с различными геометрическими параметрами дефекта. Для обучения использовались 14 000 экземпляров, 2 000 для тестирования и 1 000 для валидации.

При обучении показателем успешности является ошибка обучения. При проверке работы нейросетевой модели на тестовых данных, которые ранее были недоступны для сети, определяется её способность к обобщению. В процессе тестирования вычисляется ошибка тестирования. Таким образом, о производительности модели можно судить по двум ключевым факторам. Первый заключается в достижении наименьшей ошибки обучения. Второй — в уменьшении разницы между ошибкой обучения и тестирования.

В области машинного обучения существует несколько техник регуляризации. При обучении нейронных сетей одной из проблем является переобучение. Оно выражается в потере способности к обобщению в процессе обучения. Одним из наиболее популярных приемов его предотвращения является

применение регуляризации Тихонова (ridge regression или L2), в машинном обучении также называемая weight decay.

Одним из важных этапов обучения нейросетевой модели является начальная инициализация весов. Одним из популярных на данный момент методов инициализации является метод Xavier [16]. Этот метод упрощает прохождение сигнала в случае прямого и обратного распространения ошибки через слои сети. Метод подходит как для линейной, так и для сигмоидной активационных функций (её ненасыщенный участок имеет линейный характер).

Метод батч-нормализации (batch-normalization) предложен Ioffe и Szegedy [17]. Во время распространения сигнала по слоям сети может произойти его искажение как по матожиданию, так и по дисперсии (этот эффект известен как внутренний ковариационный сдвиг). Это может вызвать некоторое несоответствие между градиентами на различных уровнях сети.

Применяются общие подходы регуляризации при обучении нейросетевой модели. Наиболее простыми из них являются ранняя остановка (early stopping) и применение техники dropout. Эти методы обеспечивают более устойчивое обучение модели. В связи с достаточным размером обучающей выборки и сложностью проведения аугментации данных, последняя не выполняется.

В рамках данной работы балансировка набора данных не проводится. Ниже на рис. 5 можно видеть распределение дефектов в зависимости от их размера.

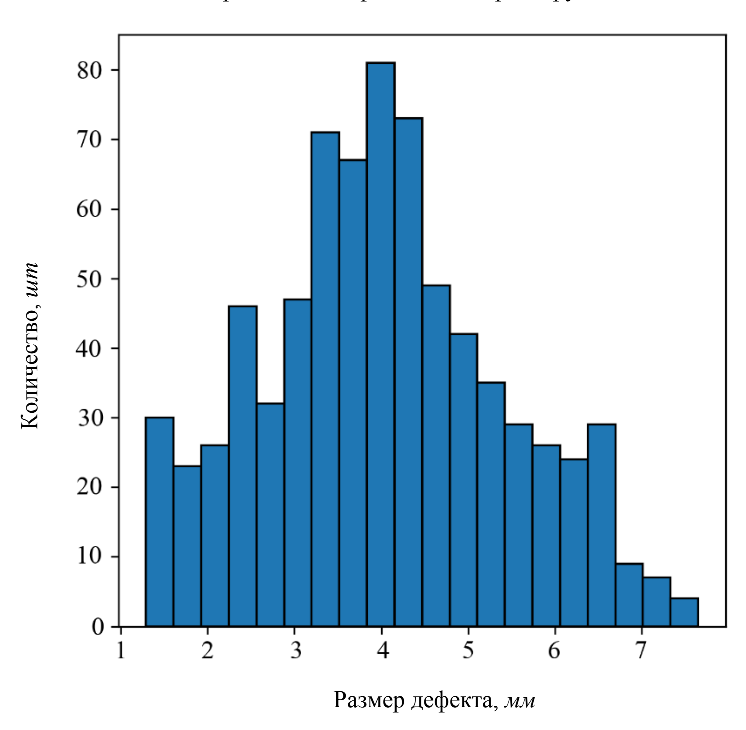



Рис. 5. Количество дефектов в зависимости от их размера в обучающем наборе данных

Обучение нейронной сети — это эквивалент решения задачи оптимизации, в которой происходит поиск минимума функции потерь. Эта функция показывает, насколько хорошо модель выполняет свою задачу. Правильный выбор функции потерь оказывает большое влияние на результат обучения. В данной задаче оптимальным выбором будет применение коэффициента схожести Жаккара (Intersection over Union). Данный показатель часто применяется в задачах компьютерного зрения и определяется как:

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A| + |B| - |A \cap B|}$$

Соответственно, функция потерь определяется как $1 - IoU$ и отражает различие между двумя экземплярами. Также она известна как расстояние Жаккара. Также для оценки качества работы нейросетевой модели применяется метрика $F1 = \frac{2 \times IoU}{IoU+1}$, которая отражает гармоническое среднее между полнотой и точностью.

Для обучения используется один из самых популярных алгоритмов Adam [18]. Авторы применили открытую библиотеку TensorFlow и фреймворк Keras. Данные программные решения содержат большинство современных алгоритмов и моделей. Для достижения приемлемого уровня работы модели потребовалось 200 эпох обучения.

**Результаты исследования.** Применение нейросетевого подхода к решению обратных задач давно зарекомендовало себя [8, 19–20]. С развитием машинного обучения и появлением новых техник становятся доступны новые методы интерпретации данных и появляются новые возможности решения классических задач механики и дефектоскопии.

Авторы представили сверточную нейросетевую модель, разработанную для решения задачи визуализации внутренних дефектов на основе методов ультразвукового неразрушающего контроля. Данная модель имеет небольшой размер, который составляет 3,8 миллиона параметров. Её простота и универсальность обеспечивают высокую скорость обучения и широкие возможности применения в классе смежных задач. Авторы используют FDTD метод симуляции распространения ультразвуковых волн и приводят сравнение его результатов с результатами конечноэлементного метода. Выбор данного метода позволил многократно повысить скорость расчета моделей, по сравнению с задачами, решаемыми ранее [21].

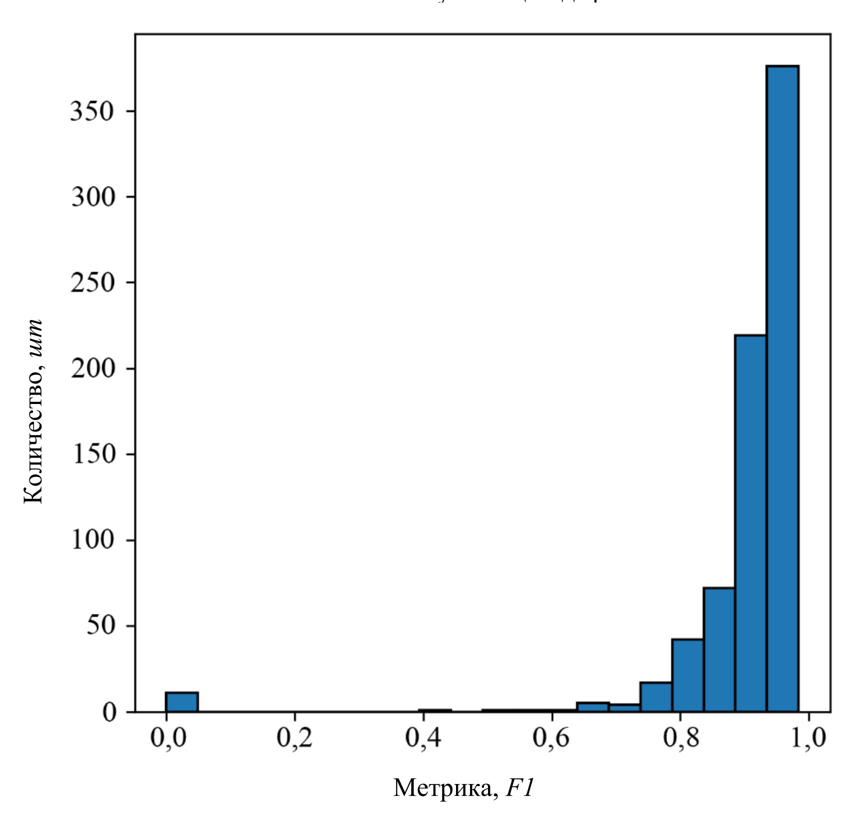



Рис. 6. Количество идентифицируемых дефектов с определенной точностью

После обучения нейросетевой модели происходит валидация её работы на соответствующем наборе данных. Для общей оценки производительности модели применяется метрика F1, описанная выше. В целом точность работы предложенного метода находится на высоком уровне. Среднее значение показателя F1 для всей валидационной выборки составляет 91 %. На рис. 6 видно, что часть дефектов не была идентифицирована нейросетевой моделью.

На рис. 7 можно видеть, как точно нейросетевая модель проводит визуализацию дефектов различного размера. Визуализация проводилась на валидационном наборе данных.



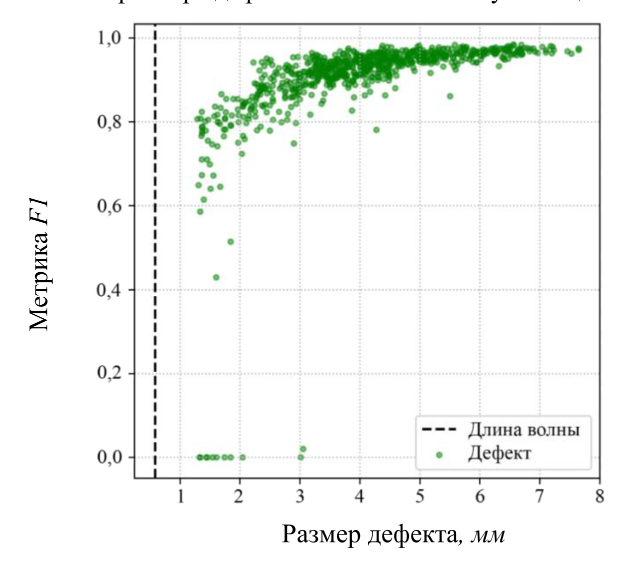




Рис. 7. Зависимость точности визуализации от размера дефекта

Ниже на рис. 8 продемонстрированы результаты работы нейросетевой модели. На приведенных изображениях видны положение, границы и форма предполагаемого дефекта.

*а*) *б*) *в*)

Рис. 8. Результат визуализации дефекта нейронной сетью: *а* — оригинальный дефект, *б* — визуализация дефекта на основе ультразвукового отклика, *в* — различие между оригинальным и восстановленным образцами

**Обсуждения и заключение.** В данной работе продемонстрирован потенциал применения методов машинного обучения в задаче ультразвуковой визуализации. Авторы построили тестовую модель неразрушающего контроля. На основе этой модели подготавливается набор данных, предназначенный для обучения нейронной сети. Предложена модель сверточной нейронной сети, позволяющая предугадать форму, положение и ориентацию дефектов внутри твердого тела. Представленные результаты показывают высокую степень информативности ультразвукового отклика и его соответствия реальной форме внутреннего дефекта.

На основе полученных результатов выявлено, что предлагаемая модель показывает высокую точность работы ($F1 > 0{,}95$) в случаях, когда длина волны зондирующего импульса в десятки раз меньше размера дефекта.

Авторы полагают, что комбинация предложенных методов в данном подходе может послужить хорошей отправной точкой для будущих исследований в области решения задач дефектоскопии и обратных задач в целом.

**Библиографический список**

1. Steel crack depth estimation based on 2D images using artificial neural networks / Yasser S. Mohamed, Hesham M. Shehata, Mohamed Abdellatif [et al.] // Alexandria Engineering Journal. — 2019. — Vol. 58 (4). — P. 1167—1174. https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.001

2. A deep transfer learning model for inclusion defect detection of aeronautics composite materials / Yanfeng Gong, Hongliang Shao, Jun Luo, Zhixue Li // Composite Structures. — 2020. — Vol. 252. — 112681. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112681

3. Three-dimensional subsurface defect shape reconstruction and visualisation by pulsed thermography / Adisorn Sirikham, Yifan Zhao, Haochen Liu [et al.] // Infrared Physics & Technology. — 2020. — Vol. 104. — 103151. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103151

4. Luiz Felipe Simões Hoffmann. Detection of liner surface defects in solid rocket motors using multilayer perceptron neural networks / Luiz Felipe Simões Hoffmann, Francisco Carlos Parquet Bizarria, José Walter Parquet Bizarria // Polymer Testing. — 2020. — Vol. 88. — 106559. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106559

5. Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic in Nondestructive Evaluation / Ryszard Sikora, Piotr Baniukiewicz, Tomasz Chady [et al.] // Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics. — 2014. — Vol. 38. — P.137−151. https://doi.org/10.3233/978-1-61499-354-4-137

6. Puzyrev, V. Deep learning electromagnetic inversion with convolutional neural networks / Vladimir Puzyrev // Geophysical Journal International. — 2019. — Vol. 218 (2). — P. 817–832. https://doi.org/10.1093/gji/ggz204

7. Soloviev, A. N. Ultrasonic and Magnetic Flow Inspection Methods of Identification of Cracks in the Pipe Coupled with Artificial Neural Networks / A.N. Soloviev, B.V. Sobol, P. V. Vasiliev // Advanced Materials. Springer Proceedings in Physics. — 2017. — Vol. 193. — P. 381−395.

8. Generative Artificial Neural Network Model for Visualization of Internal Defects of Structural Elements / A. Soloviev, B. Sobol, P. Vasiliev, A. Senichev // Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials. — 2020. — Vol. 6. — P. 587−595. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_48

9. Identification of crack-like defect and investigation of stress concentration in coated bar / B.V. Sobol, A.N. Soloviev, E. V. Rashidova P. V. Vasiliev // PNRPU Mechanics Bulletin. — 2019. — No. 4. — P. 165−174. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.4.16

10. Yee, K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / Kane Yee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1966. — Vol. 14 (3). — P. 302−307. https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693

11. Berenger, J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves / Jean-Pierre Berenger // Journal of Computational Physics. — 1994. — Vol. 114 (2). — P. 185−200.

12. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. LeCun, B. Boser, J.S. Denker [et al.] // Neural Computation. — 1989. — Vol. 1 (4). — P. 541−551. https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541

13. Goodfellow, I. Deep learning. Vol. 1. /Ian. Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville // MIT Press, Cambridge, 2016. — 800 p.

14. Krizhevsky, A. ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2012. — Vol. 25. — P. 1097–1105.

15. Deep residual learning for image recognition / Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2016. — P. 770−778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90

16. Glorot, X. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks / Xavier Glorot, Yoshua Bengio // JMLR Proceedings. — 2010. — Vol. 9. — P. 249−256.

17. Ioffe, S. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. / S. Ioffe, Ch. Szegedy // Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning. — 2015. — Vol. 37. — P. 448–456.

18. Kingma, D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. Ba // In: Proc. 3rd International Conference for Learning Representations. — 2014. arXiv preprint arXiv:1412.6980

19. Puzyrev, V. Deep learning electromagnetic inversion with convolutional neural networks / Vladimir Puzyrev // Geophysical Journal International. — 2019. — Vol. 218 (2). — P. 817–832. https://doi.org/10.1093/gji/ggz204

20. Two-dimensional Ultrasound Imaging Technique based on Neural Network using Acoustic Simulation / Y. Nagatani, S. Okumura, S. Wu, T. Matsuda // Medical Physics. — 2020. arXiv:2004.08775v1

21. Solov'ev, A. N. Ultrasonic Location of Inner Crack Defects in a Compound Elastic Cylinder Using an Artificial Neural-Network Apparatus / A. N. Solov'ev, B. V. Sobol', P. V. Vasil'ev // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2016. — Vol. 52 (3). — P. 119–124.

Поступила в редакцию 26.02.2021
Поступила после рецензирования 02.04.2021
Принята к публикации 04.06.2021

*Об авторах:*

**Васильев Павел Владимирович,** старший преподаватель кафедры «Информационные технологии», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Researcher ID: P-8366-2017, Scopus ID: 57193327081, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4112-7449, lyftzeigen@mail.ru

**Сеничев Александр Вадимович,** аспирант кафедры «Информационные технологии», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2001-8235, alexandr.senichev@gmail.com

**Джорджо Иван,** профессор кафедры «Гражданское, строительно-архитектурное и экологическое проектирование» Л'Акуила, Италия; исследователь в Международном исследовательском центре математики и механики сложных систем (Via Camponeschi, 19 Piazza Santa Margherita, 2 Palazzo Camponeschi, 67100 L'Aquila AQ, Italy), кандидат наук, Researcher ID: E-9341-2010, Scopus ID: 24757867200, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0044-9188, ivan.giorgio78@gmail.com

*Заявленный вклад соавторов:*

П. В. Васильев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования; А. В. Сеничев — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; И. Джорджо — доработка текста, корректировка выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
# MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.9:531.3 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-154-162

## Влияние жесткости механической части привода и параметров резания на управление упругими деформациями формообразования



**В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, А. А. Закалюжный**
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

***Введение.*** Одно из направлений повышения точности изготовления деталей резанием связано с управлением упругими деформациями инструмента и заготовки. Особенно это относится к деталям малой жесткости, закон изменения которой вдоль траектории движения инструмента является заданным. При этом управляющим параметром, как правило, выступает величина оборотной подачи, влияющая на силы резания, изменение которых вызывает вариации упругих деформаций. Для обеспечения заданной точности диаметра необходимо согласовать управляемую траекторию частоты вращения привода подачи с величиной подачи и априорно заданным законом изменения жесткости заготовки или законом изменения параметров процесса резания. Для этого необходимо определить закон преобразования частоты вращения двигателя в величину подачи и в конечном счете в упругие деформации. Этот закон зависит от жесткости механической части привода подачи и изменяющихся параметров процесса резания.

***Материалы и методы.*** В статье приводится математическое моделирование и на его основе — анализ преобразования скорости подачи в силы резания с учетом конечного значения жесткости механической части привода и эволюционно изменяющихся параметров процесса резания.

***Результаты исследования.*** Показано, что начиная с некоторого критического значения закон преобразования скорости подачи в силы резания становится принципиально зависящим от жесткости механической части привода. При этом наблюдается увеличение времени установления нового значения силы при варьировании скорости подачи, что влияет на точность обеспечения сил, согласованных с законом изменения жесткости детали. В статье приводятся алгоритмы вычисления упругих деформаций при заданном законе изменения жесткости, а также алгоритмы вычисления траектории скорости подачи, при которой деформации остаются постоянными. Показано, что на закон преобразования влияют и вариации параметров резания.

***Обсуждение и заключение****.* Обсуждаются частотные и временные характеристики преобразования. Делается заключение о точности формируемого резанием диаметра в зависимости от жесткости механической части привода подачи и от некоторых параметров процесса резания.

***Ключевые слова:*** силы резания, управление упругими деформациями, жесткость механической части привода подачи.

***Для цитирования:*** Заковоротный, В. Л. Влияние жесткости механической части привода и параметров резания на управление упругими деформациями формообразования / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, А. А. Закалюжный // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 154–162. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-154-162

***Финансирование:*** Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ: № 19-08-00022 и № 20-38-90074.





## Influence of stiffness of the mechanical part of the drive and cutting parameters on the shaping elastic deformation control

**V. L. Zakovorotny, V. E. Gvindjiliya, A. A. Zakalyuzhny**
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

***Introduction.*** One of the ways to improve the accuracy of manufacturing parts by cutting is related to the control of elastic deformations of the tool and the workpiece. This is particularly true for slender parts, whose stiffness law along the tool path is given. In this case, the control parameter, as a rule, is the return flow rate, which affects the cutting forces, whose change causes variations in elastic deformations. To provide the specified accuracy of the diameter, it is required to coordinate the controlled trajectory of the feed drive speed with the feed rate and a priori given law of change in the stiffness of the workpiece or the law of variation of the cutting process parameters. To do this, it is required to determine the law of converting the engine speed into the feed rate, and, ultimately, into elastic deformations. This law depends on the stiffness of the mechanical part of the feed drive and the changing parameters of the cutting process.
***Materials and Methods.*** The paper presents mathematical modeling and, on its basis, analysis of the conversion of the feed rate into cutting forces, taking into account the final stiffness value of the mechanical part of the drive and the evolutionary parameters of the cutting process.
***Results.*** It is shown that, starting from a certain critical value, the law of converting the feed rate into cutting forces becomes fundamentally dependent on the stiffness of the mechanical part of the drive. At the same time, there is an increase in time for setting a new force value when the feed rate varies, which affects the accuracy of providing forces that are consistent with the stiffness law of the part. The paper presents algorithms for calculating elastic deformations for a given stiffness law, as well as algorithms for calculating the trajectory of the feed rate at which the deformations remain constant. It is shown that the law of conversion is also affected by variations in the cutting parameters.
***Discussion and Conclusion.*** The frequency and time characteristics of the conversion are discussed. A conclusion is made about the accuracy of the diameter formed through cutting, depending on the stiffness of the mechanical part of the feed drive and on some parameters of the cutting process.

***Keywords:*** cutting forces, control of elastic deformations, stiffness of the mechanical part of the feed drive.

***For citation:*** V. L. Zakovorotny, V. E. Gvindjiliya, A. A. Zakalyuzhny. Influence of stiffness of the mechanical part of the drive and cutting parameters on the shaping elastic deformation control. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 154–162. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-154-162

***Funding information:*** The research is done with the financial support from RFFI (grants nos. 19-08-00022 and 20-38-90074).

**Введение.** Синергетическая парадигма привела к пересмотру многих подходов к анализу свойств систем, взаимодействующих с различными средами [1–19]. Она используется при изучении процесса резания, как единой нелинейной динамической системы, в которой рассматриваются различные физические процессы, характеризующие состояние системы [10–18]. Системно-синергетический подход лежит в основе синергетической теории управления, а также управления процессами обработки на станках [18–24]. В таком случае обеспечивается согласование внешнего управления с внутренней динамикой резания [23–25]. Проблемы синергетического согласования актуальны при обработке маложестких деталей, у которых априорно задан закон ее изменения вдоль траекторий движения инструмента [13, 26–29]. Во всех указанных случаях необходимо осуществлять управление упругими деформационными смещениями вершины инструмента и заготовки в точке контакта с ней инструмента. Необходимо отметить, что погрешности геометрической топологии детали, формируемой резанием, на 60–80 % обусловлены упругими деформационными смещениями элементов системы резания [11, 13, 30]. Основные направления совершенствования систем управления процессами обработки на станках связаны с объединением собственно станка и ЭВМ [30–33]. Проблема же управления упругими деформационными смещениями инструмента и заготовки сформулирована еще в работах [34]. Наконец, синергетический подход к анализу и синтезу систем управления процессами обработки на станках, сформулированный в работах [23–25], поставил задачу построения систем управления процессами обработки на станках с ЧПУ на основе согласования программы исполнительных элементов станка с эволюционно изменяющимися свойствами процесса резания. Такой подход использован и при совершенствовании систем управления сверлением глубоких отверстий малого диаметра, а также при обеспечении устойчивости траекторий формообразующих движений [25, 35]. Таким образом, как при управлении процессами обработки на станках, так и при программировании траекторий формообразующих движений необходимо знать законы преобразования управляемых траекторий исполнительных элементов

станка в силы резания и, как следствие, при заданных упругих свойствах подсистем инструмента и заготовки в упругие их деформации. Они непосредственно влияют на параметры точности изготовления деталей. На законы преобразования влияет жесткость механической части приводов исполнительных элементов станка и параметры, характеризующие состояние процесса резания. Именно раскрытию влияния этих параметров на преобразование программируемых траекторий серводвигателей в силы резания посвящено исследование, приведенное в статье. Оно направлено на повышение эффективности управления точностью изготовления деталей.

**Материалы и методы.** Рассмотрим продольное точение вала постоянного диаметра, в котором задан закон изменения его жесткости в направлении, нормальном к оси вращения (рис. 1). При описании преобразования траекторий серводвигателей в силы, действующие на инструмент, примем следующие гипотезы:

1. Рассмотрим случай, при котором заданная вдоль оси вращения жесткость $c(L)$ заготовки на порядок меньше жесткости подсистемы инструмента (рис. 1). Поэтому деформациями инструмента относительно несущей системы станка можно пренебречь.

2. Будем считать заданными и управляемыми в пределах полос пропускания серводвигателей траектории вращения шпинделя и привода суппорта. Инерционность механической части привода подачи отнесем к ротору двигателя подачи. Она влияет на переходные процессы в серводвигателе.

3. Реакцией на скорости серводвигателей со стороны процесса резания пренебрегаем. Это справедливо, если мощность резания, приведенная к роторам двигателей, существенно меньше мощности серводвигателей.

4. Будем рассматривать, кроме упругости заготовки, упругость всей механической части привода подачи, которую учтем обобщенной жесткостью $c_0$. Так как в процессе обработки реверсирование привода подачи отсутствует, то жесткость $c_0$ можно считать постоянной на всей траектории движения суппорта.

5. Для формирования сил при постоянной скорости резания примем гипотезу об их зависимости от площади срезаемого слоя. Запаздыванием сил по отношению к изменению площади среза пренебрегаем [23–24].

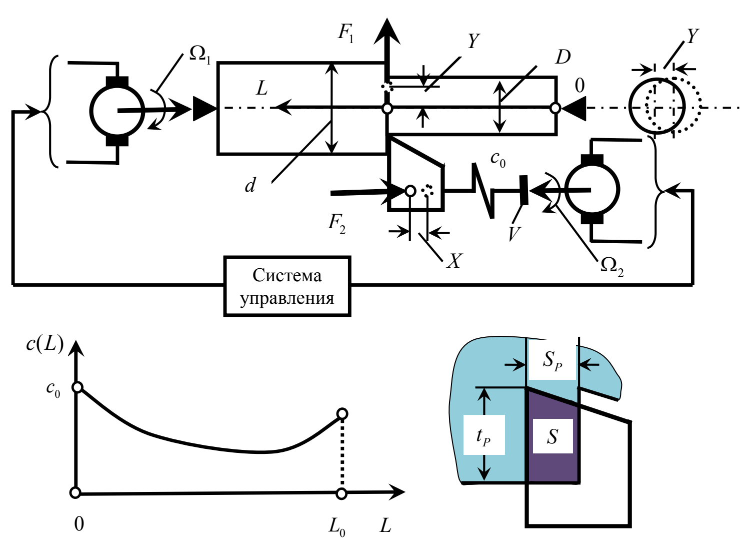



Рис. 1. Схема динамической системы преобразования траекторий исполнительных элементов станка в силы резания

Тогда модуль силы резания пропорционален площади срезаемого слоя

$$\mathrm{F(t)} = F_0\{\chi_1, \chi_2\}^T, \tag{1}$$

где $F_0 = \rho S$ — модуль силы резания в $[кг]$;

$\rho$ — давление стружки на переднюю поверхность инструмента в $[кг/мм^2]$;

$S$ — площадь срезаемого слоя в $[мм^2]$;

$\chi_1, \chi_2$ — безразмерные коэффициенты. Связь скорости подачи $V$ и упругих деформационных смещений $X$ и $Y$ определяется из системы (рис. 1).

$$\begin{cases} c_0 X = \chi_2 \rho (t_P - Y) \int\limits_{t-T}^{t} [V(\xi) - v(\xi)] d\xi; \\ c(L) Y = \chi_1 \rho (t_P - Y) \int\limits_{t-T}^{t} [V(\xi) - v(\xi)] d\xi, \end{cases} \quad (2)$$

где $v(t) = dX / dt$ ; $V(t) = k\Omega_2(t)$ ;

$k$ — коэффициент, определяющий связь частоты вращения привода подачи и скорости суппорта в $[мм]$.

Частоты $\Omega_1$ и $\Omega_2$ рассматриваются в $\left[c^{-1}\right]$. Поэтому время $T$ в интегральном операторе формирования подачи $T = (\Omega_1)^{-1} = const$ .

Изучение преобразования скорости подачи $V$ в силы резания удобно выполнить в частотной области. Для этого можно воспользоваться преобразованиями Лапласа и Фурье [36]. Однако система (2) имеет не только запаздывающие аргументы, но и мультипликативные члены. Использование же методов преобразования Лапласа и Фурье возможно лишь для линейных систем. Поэтому исследование выполним в два этапа. На первом этапе в (2) положим $Y \to 0$ по сравнению с глубиной резания $t_P$. Тогда проанализируем преобразование скорости подачи в силы на основе выражения

$$c_0 X = \chi_2 \rho t_P \int\limits_{t-T}^{t} [V(\xi) - v(\xi)] d\xi. \quad (3)$$

Нетрудно показать, что передаточная функция $W(p) = F(p) / V(p)$ равна

$$W(p) = c_\Sigma \frac{1 - \exp(-Tp)}{p} \frac{1}{1 + \frac{c_\Sigma}{c_0}[1 - \exp(-Tp)]} \quad (4)$$

где $c_\Sigma = \rho t_P \chi_2$ имеет смысл жесткости процесса резания. Выражение (4) позволяет выяснить частотные свойства преобразования скорости подачи $V$ в силу резания $F$ в зависимости от безразмерного параметра $A = c_\Sigma / c_0$. Этот параметр определяет отношение жесткости процесса резания к жесткости механической части привода подачи. При $A \to 0$ передаточная функция $W(p) \Rightarrow c_\Sigma \frac{1 - \exp(-Tp)}{p}$. При $A \to \infty$ $W(p) \Rightarrow \frac{c_\Sigma}{p}$. Это два крайних случая. Если случай $A \to 0$ возможен при существенном увеличении жесткости механической части привода по сравнению с жесткостью процесса резания, то второй случай требует уменьшения жесткости привода до нуля, что для реальных систем невозможно. Приведем примеры $W(j\omega)$ для различных $A$ (рис. 2). Амплитуда рассмотрена в относительных единицах к $c_\Sigma = 1$.

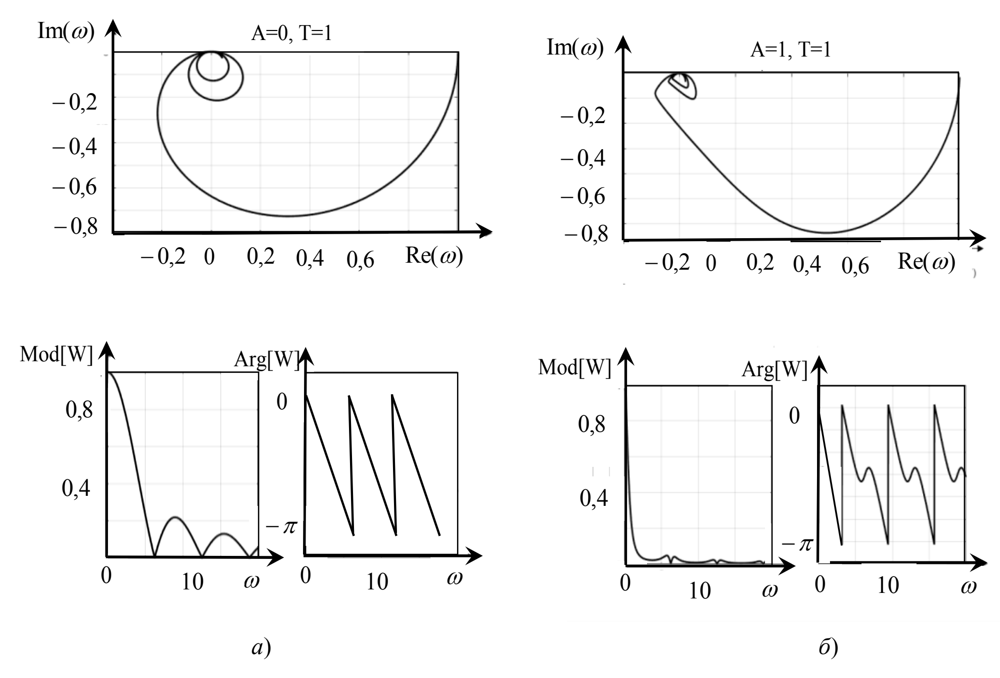



Рис. 2. Пример частотных характеристик преобразования скорости подачи в модуль силы резания: а–A=0, б–A=1

Вначале рассмотрим случай, когда деформации механической части между ротором двигателя подачи и перемещением суппорта отсутствуют (рис. 2 *а*). Такая частотная характеристика обусловлена свойством интегрального оператора $\int_{t-T}^{t} V(\xi)d\xi$ формирования величины подачи, который раскрывает тот факт, что величина подачи есть путь, пройденный инструментом относительно заготовки в течение периода ее вращения. Естественно, что составляющие изменения скорости подачи, частота которых равна или кратна частоте вращения заготовки, после интегрирования обращаются в ноль. Это частоты, на которых $Mod[W(j\omega)]=0$ (рис. 2). При этом наблюдается быстрое вращение фазы на частотах, близких к частоте вращения заготовки, что способствует самовозбуждению систем управления процессом резания. Увеличению податливости механической части привода соответствует изменение частотных свойств преобразования скорости $V$ в силы резания. Во-первых, полоса пропускания этого преобразования заметно уменьшается, что должно способствовать увеличению времени переходного процесса при установлении нового значения управляемых сил резания. Во-вторых, периодические вариации фазы наблюдаются в области большего затухания амплитуды. Наконец, при еще больших увеличениях податливости характеристики преобразования скорости в силы приближаются к интегрирующему звену. В основе механизма затягивания переходного процесса лежит перераспределение сил, влияющих на деформационные смещения, и деформационных смещений, влияющих, в свою очередь, на силы. Этот функционально связанный процесс зависит от жесткости механической части привода подачи.

Приведенный анализ позволяет также оценить влияние на динамику преобразования скорости $V$ в силы резания деформационных смещений заготовки в направлении оси ее вращения (направление $Y$ на рис. 1). Очевидно, что при уменьшении жесткости $c$ уменьшается и параметр $A$, влияющий на динамику преобразования скорости подачи в силы резания.

**Алгоритм вычисления траектории скорости подачи.** Для обеспечения заданных значений диаметра путем управления деформацией $Y$ необходимо подобрать такие траектории скорости $V$, при которых $Y=const$. Для этого вместо интегрального оператора в (2) рассмотрим его первообразные, то есть

$$\begin{cases} c_0 X = \chi_2\rho(t_P - Y)[L(t)-L(t-T)-X(t)+X(t-T)]; \\ c(L)Y = \chi_1\rho(t_P - Y)[L(t)-L(t-T)-X(t)+X(t-T)], \end{cases} \tag{5}$$

где $L(t)$ — траектория перемещения суппорта без учета упругих деформаций, то есть $L(t)=\int_0^t V(\xi)d\xi$. В (5) $L(t)-L(t-T)=S_P^{(0)}(t)$ — текущее значение подачи без учета деформационных смещений. Если $c(L)=const$ и рассматривается установившееся состояние ($X(t)=X(t-T)$), то $S_P^{(0)}=S_P=VT$. Здесь $S_P(t)=S_P^{(0)}-[X(t)-X(t-T)]$. Подчеркнем, что величина подачи $S_P^{(0)}$, оцениваемая традиционно, отличается от действительного ее значения $S_P(t)$.

Будем вычислять деформационные смещения в (5) последовательно после каждого оборота заготовки и определим последовательности $\mathrm{X(iT)}=\{X(0),X(T),...X(nT)\}$, $\mathrm{Y(iT)}=\{Y(0),Y(T),...Y(nT)\}$, $\mathrm{S_P(t)}=\{S_P(T),..S_P(nT)\}$, $\mathrm{c(T)}=\{c[S_P(T)],...c[(\sum_{i=1}^{i=n} S_P(iT)]\}$. Таким образом, за $n$ оборотов заготовки суппорт проходит расстояние $L(n)=\sum_{i=1}^{i=n} S_P(iT)$. В этих последовательностях $X(0)=Y(0)=0$. Можно рассмотреть решение двух задач.

*Первая задача анализа,* то есть определения траекторий деформационных смещений X(iT) и Y(iT) при постоянной скорости подачи. Для вычисления значений $X(T),Y(T)$ и последующих величин деформационных смещений $X(iT),Y(iT)$ можно воспользоваться соотношениями, в которых известны все предыдущие значения $X[(i-1)T)],Y[(i-1)T)]$, а также $c[(\sum_{l=1}^{l=i-1} S_P(lT)]$. Здесь $V=const$, следовательно, $c[(\sum_{l=1}^{l=i-1} S_P(lT)]=(c(iS_P)$. Таким образом, для вычисления $X(iT),Y(iT)$ можно воспользоваться системой

$$\mathrm{c_\Sigma Z^{(i)}=F^{(i)}}, \tag{6}$$

где $\mathrm{Z^{(i)}}=\{Y(iT),X(iT)\}^T$; $\mathrm{F^{(i)}}=\rho S_P^{(0)}[t_P+X((i-1)T)]\{\chi_2,\chi_1\}^T$;

$$c_\Sigma = \begin{bmatrix} c_0 + \chi_2 \rho t_P & \chi_2 \rho S_P^{(0)} \\ \chi_1 \rho t_P & [(c(iS_P) + \chi_1 \rho S_P^{(0)} \end{bmatrix}.$$

В (5) отброшены мультипликативные члены от деформационных смещений, которые являются малыми величинами. При заданной скорости $V = const$ нас интересует прежде всего закон изменения деформационных смещений $\mathrm{Y(iT)} = \{Y(0), Y(T), ...Y(nT)\}$, который характеризует погрешность диаметра. На основе (6) для деформационных смещений $Y(iT)$, непосредственно влияющих на диаметр детали, получаем

$$Y(iT) = \frac{\chi_2 \rho c(iS_P) S_P^{(0)} \{t_P + X[(i-1)T)]\}}{c_0 c(iS_P) + \chi_1 \rho c_0 S_P + \chi_2 \rho c(iS_P) t_P}. \quad (7)$$

Таким образом, $Y(iT)$ зависят не только от закона распределения жесткости заготовки $c(L)$ по пути резания $L$, но и от $\partial c(L)/\partial L$, влияющего на $Y(t-T)$. На силы резания, следовательно, диаметр $D$, влияет давление стружки $\rho$. Оно меняется, например, по мере нарастания износа инструмента, изменения его геометрии, условий обработки и свойств обрабатываемого материала.

*Вторая задача синтеза,* то есть определения последовательности $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ...S_P(nT)\}$ и соответствующей ей скорости $V(t)$ таким образом, чтобы выполнялось условие $Y(iT) = const, \quad Y(iT) \in \mathrm{Y(iT)}$. Это условие постоянства диаметра при заданном законе $c(L)$ при прочих неизменных условиях. Заметим, что постоянные составляющие в деформационных смещениях $\mathrm{Y(iT)}$ не имеют принципиального значения, так как могут учитываться с помощью статической установки инструмента [34]. Для определения закона изменения величины подачи на каждом обороте заготовки по критерию обеспечения постоянства диаметра необходимо в (7) положить $Y(iT) = const$. Тогда необходимо вычислить последовательность $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ...S_P(nT)\}$. Процедура вычисления на $i$-ом обороте заготовки заключается в определении $S_P(iT)$ при условии, что заданы $\mathrm{X(iT)} = \{X(0), X(T), ...X[(i-1)T]\}$, $\mathrm{Y(iT)} = \{Y^*(0), Y^*(T), ...Y^*[(i-1)T]\}$, следовательно, определены все величины подач $\mathrm{S_P(t)} = \{[S_P(T) = Y(T) - Y(0)], ...S_P[(i-n)T = [Y((i-1)T) - Y((i-2)T)]\}$. Из (7) получаем

$$S_P(iT) = \frac{Y^* c[(\sum_{l=1}^{l=i-1} S_P(lT)]\{c_0 + \chi_2 \rho t_P\}}{\chi_1 \rho c_0 \{t_P + X[(i-1)T] - Y^*\}}, \quad (8)$$

где $Y^* = const$ — заданная величина упругих деформационных смещений.

В (8) значение жесткости заготовки берется средним в течение каждой подачи. Тогда на основе вычисленных $\mathrm{S_P(t)} = \{S_P(T), ...S_P(nT)\}$ определяются закон изменения $V(t)$ и, следовательно, программируемая траектория скорости подачи во времени или пути. Вычисление траектории $V(t)$ осуществляется на основе решения обратных задач динамики [37–38].

**Результаты исследования.** Для обеспечения точности изготовления маложестких валов необходимо согласовать траектории исполнительных элементов станка с изменяющейся жесткостью заготовки вдоль траектории движения инструмента. Согласование необходимо выполнить и в том случае, если учитываются эволюционные изменения свойств процесса резания, обусловленные, например, изнашиванием инструмента или термодинамическими процессами, а также регулярными возмущениями, к примеру, вариациями припуска. Для этого прежде всего требуются знания законов преобразования программируемой скорости подачи суппорта в силы резания и далее в сами деформации, изменяющие текущее значение диаметра заготовки. Выполненные исследования показали, что закон преобразования зависит от параметров жесткости взаимодействующих подсистем и параметров динамической связи, формируемой процессом резания.

Среди параметров жесткости принципиальное значение имеют характеристики жесткости механической части приводов подачи, которые можно оценить суммарной приведенной жесткостью $c_0$. Она изменяет амплитудно-фазовую частотную характеристику преобразования скорости подачи в силы резания (рис. 2). Как видно, уменьшение жесткости привода существенно уменьшает амплитуду по мере роста частоты и изначальная АФЧХ, которая имела заметные всплески, преобразуется в характеристику с амплитудным затуханием. Такая характеристика вызывает преобразования колебательных переходных процессов в монотонные, близкие к апериодическим. По мере уменьшения $c_0$ наблюдается уменьшение частоты среза в преобразовании скорости подачи в силы резания (рис. 2), следовательно, возрастает время переходного процесса, например, изменения силы резания при врезании инструмента. Пример изменения переходных процессов установления силы $F_0$ при точении вала из стали 20Х диаметром 80 мм приведен на

рис. 3. Точение на режимах: скорость резания 4,0 м/с (частота вращения шпинделя — 1000 об/мин), глубина резания $t_P$ — 2,0 мм, величина подачи $S_P$ — 0,1 мм. Для этого случая $\rho = 400\ кг / мм^2$.

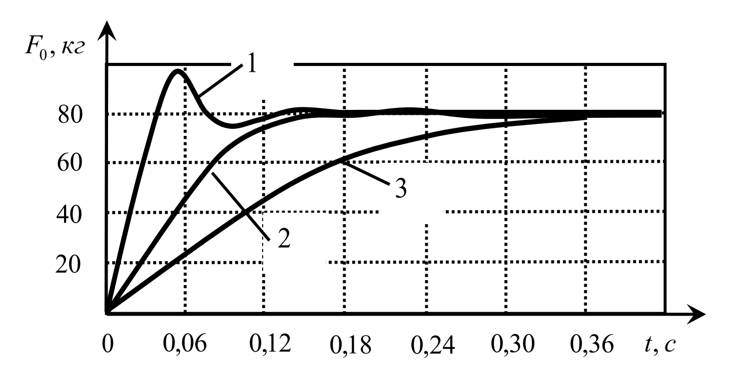



Рис. 3. Пример изменения переходных процессов установления силы:

$F_0$ : *1 — $c_0$ = 1000 кг/мм, 2 — $c_0$ = 750 кг/мм, 3 — $c_0$ = 500 кг/мм*

Из отмеченных выше свойств интегрального оператора формирования величины подачи следует важное заключение о возможности управления силами резания, следовательно, упругими деформационными смещениями инструмента относительно заготовки. При изменении скорости подачи частотные составляющие возмущений, равные или кратные частоте вращения заготовки, становятся неуправляемыми с помощью вариации скорости привода подачи. Например, это вариации припуска, обусловленные несоосностью установки заготовки, радиальные биения шпинделя и пр. Приведенные данные также показывают, что переходные процессы преобразования скорости подачи в силы зависят также от параметров динамической связи, формируемой процессом резания, и прежде всего от параметра давления стружки на переднюю поверхность инструмента. Этот параметр изменяется по мере развития износа инструмента. На динамику преобразования траекторий исполнительных элементов станка в силы резания оказывают влияние все факторы, связывающие силы резания с площадью срезаемого слоя. Эти факторы ограничивают возможности управления точностью изготовления деталей путем варьирования траекторий исполнительных элементов станка. Это относится прежде всего к обработке деталей сложной геометрической формы.

**Обсуждение и заключения.** Одно из направлений повышения точности изготовления деталей на станках связано с согласованием программы ЧПУ с изменяющимися динамическими свойствами процесса резания. Причем эти изменения могут быть заданы априорно. Например, априорно может быть задан закон изменения матриц жесткости вдоль траектории исполнительных элементов станка. Они могут развиваться по некоторому случайному закону, например, в связи с развитием износа инструмента. Во многих случаях управление точностью осуществляется на основе изменения упругих деформационных смещений инструмента и заготовки. Как показано в статье, закон преобразования скорости подачи в силы резания и упругие деформационные смещения, во-первых, зависит от параметров упругости механической части приводов подачи, влияя не только на время переходных процессов, но и на их форму. Во-вторых, закономерности преобразования скорости подачи в силы зависят от эволюции параметров взаимодействующих подсистем со стороны инструмента и заготовки, а также параметров формируемой резанием динамической связи. Раскрытые закономерности преобразования позволяют не только выяснить ограничения, накладываемые системой резания на возможности управления точностью, но и повысить их точность.

**Библиографический список**

1. Haken, H. Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems / H. Haken. — Amsterdam: Elsevier, 2006. — 251 p.

2. Prigogine, I. The second law as a selection principle: The microscopic theory of dissipative processes in quantum systems / I. Prigogine, C. George // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 1983. — Vol. 80 (14). — P. 4590−4594. https://doi.org/10.1073/pnas.80.14.4590

3. Эбелинг, В. Физика процессов эволюции. Синергетический подход / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель ; [перевод с немецкого Ю. А. Данилова]. — Москва : Эдиториал УРСС, 2001. — 328 с.

4. Моисеев, Н. Н. Расставание с простотой (Путь к очевидности) / Н. Н. Моисеев. — Москва : Аграф, 1998. — 472 с. ISBN 5-7784-0050-0.

5. Николис, Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Дж. Николис, Ю. А. Данилов. — Москва : Мир, 1989. — 488 с.

6. Заковоротный, В. Л. Модель управления современным предприятием на основе системносинергетического подхода / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек, Е. А. Угнич // Экономическая наука современной России. — 2016. — № 4 (75). — С. 112–128.

7. Колесников, А. А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза / А. А. Колесников. — Таганрог : ТТУ ЮФУ, 2007. — 384 с.

8. Заковоротный, В. Л. Динамика транспортных трибосистем / В. Л. Заковоротный, В. В. Шаповалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2005. — № 12. — С. 19–24.

9. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Донской гос. техн. ун-т, 2019. — 289 с.

10. Оптимизация режима резания при лезвийной обработке / А. А. Рыжкин, Д. В. Моисеев, А. И. Боков [и др.]. — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. — 34 с.

11. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. — Москва : Машиностроение, 2009. — 640 с.

12. Мигранов, М. Ш. Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации / М. Ш. Мигранов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2006. — № 11. — С. 65–71.

13. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. — Москва : Машиностроение, 2005. — 736 с.

14. Мелентьев, Г. А. Резание материалов ; учебник / Г. А. Мелентьев, А. Г. Схиртладзе, В. П. Борискин. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2019. — 512 с.

15. Кузнецов, В. А. Системный анализ и моделирование технологических методов изготовления деталей / В. А. Кузнецов, А. А. Черепахин, А. В. Смирнов. — Москва : КноРус, 2019. — 248 с.

16. Лапшин, В. П. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов / В. П. Лапшин, В. В. Христофорова, С. В. Носачев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2020. — Т. 22, № 3. — С. 44–58. http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58

17. Моделирование влияния температуры в зоне контакта инструмента и детали на динамику деформационных движений инструмента при точении металлов / В. П. Лапшин, И. А. Туркин, В. В. Христофорова, Т. С. Бабенко // СТИН. — 2019. — № 10. — С. 31–37.

18. Лапшин, В. П. Пример экспериментальной оценки износа на составляющие силы резания при точении металлов / В. П. Лапшин, И. А. Туркин, В. В. Христофорова // СТИН. — 2020. — № 4. — С. 41–44.

19. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления (инварианты, оптимизация, синтез) / А. А. Колесников. — Таганрог : Таганрогский государственный радиотехнический университет Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 343 с.

20. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. — Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 344 с.

21. Колесников, А. А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, Ал. А. Колесников, А. А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2017. — Т. 18, № 9. — С. 579–589. https://doi.org/10.17587/mau.18.579-589

22. Колесников, А. А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления / А. А. Колесников, Ал. А. Колесников, А. А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17, № 10. — С. 657–669. https://doi.org/10.17587/mau.17.657-669

23. Заковоротный, В. Л. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек, Фам Динь Тунг // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 10 (61). — С. 1785–1797.

24. Заковоротный, В. Л. Синергетический подход к управлению процессом обработки на станках токарной группы / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2019. — № 11 (101). — С. 29–38. https://10.30987/article_5d9dc9b8e6bdd8.19855459

25. Заковоротный, В. Л. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра / В. Л. Заковоротный, Е. Ю. Панов, П. Н. Потапенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2001. — Т. 1, № 2. — С. 81–93.

26. Азаров, А. С. Высокопроизводительная обработка валов в машиностроении / А. С. Азаров. — Ленинград : Машгиз, 1951. — 224 с.

27. Бобровский, А. В. Технология механической обработки маложестких осесимметричных деталей / А. В. Бобровский, О. И. Драчев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2019. — № 9 (232). — С. 15–17.

28. Драчев, О. И. Система автоматического управления эксплуатационной точностью длинномерных валов / О. И. Драчев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2017. — № 5 (200). — С. 18–20.

29. Жолобов, А. А. Прогнозирование и обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2014. — № 1 (42). — С. 6–14.

30. Плотников, А. Л. Управление системами и процессами / А. Л. Плотников. — Волгоград : ВолгГТУ, 2010. — 167 с.

31. Михеев, Ю. Е. Системы автоматического управления станками / Ю. Е. Михеев, В. Л. Сосонкин. — Москва : Машиностроение, 1978. — 264 с.

32. Легаев, В. П. Повышение эффективности токарной обработки на основе автоматического контроля показателей процесса резания / В. П. Легаев, Л. К. Генералов // Вестник машиностроения. — 2011. — № 1. — С. 44–46. https://doi.org/10.3103/S1068798X1101014X

33. Максимов, С. П. Современное состояние и перспективы развития систем ЧПУ / С. П. Максимов, В. Э. Колосов, К. Н. Морозов // Инновации в науке. — 2014. — № 40. — С. 40–45.

34. Адаптивное управление станками / Б. М. Базров [и др.]. — Москва: Машиностроение, 1973. — 688 с.

35. Заковоротный, В. Л. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2 (194). — С. 52–61. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-2-52-61

36. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — Москва : Наука, 1968. — 720 с.

37. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П. Д. Крутько. — Москва : Наука, 1987. — 304 с.

38. Галиуллин, А. С. Методы решения обратных задач динамики / А. С. Галиуллин. — Москва : Наука, 1986. — 224 с.

Поступила в редакцию 28.04.2021
Поступила после рецензирования 02.06.2021
Принята к публикации 04.06.2021

*Об авторах:*

**Заковоротный Вилор Лаврентьевич,** профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID I-2990-2014, Scopus ID 7005349023, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2187-9897, vzakovorotny@dstu.edu.ru

**Гвинджилия Валерия Енвериевна,** аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Researcher ID: AAM-4580-2020, Scopus Author ID: 57204638971, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-4604, sinedden@yandex.ru

**Закалюжный Алексей Александрович,** аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1888-3222, zakalizhnuy-95@yandex.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Л. Заковоротный — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, анализ результатов исследований; В. Е. Гвинджилия — моделирование процесса резания, подготовка текста, формирование выводов, А. А. Закалюжный — проведение расчетов, моделирование частотных и переходных характеристик.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



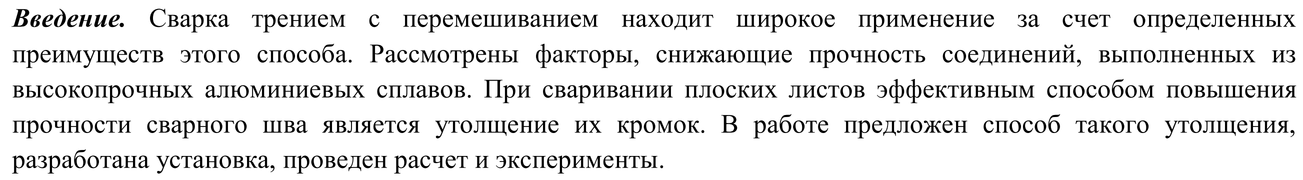




УДК 621.791.14 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-163-170

# Технология и оборудование получения утолщённых кромок под сварку трением с перемешиванием

**Ю. Г. Людмирский[1], А. Н. Соловьёв[1], М. В. Солтовец[1], Р. Р. Котлышев[2], И. В. Миронов[2], А. В. Крамской[3]**
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ООО «Головной орган по сертификации сварочного производства Южного Региона» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[3]Филиал АО «АЭМ-технологии» (г. Волгодонск, Российская Федерация)



***Введение.*** Сварка трением с перемешиванием находит широкое применение за счет определенных преимуществ этого способа. Рассмотрены факторы, снижающие прочность соединений, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов. При сваривании плоских листов эффективным способом повышения прочности сварного шва является утолщение их кромок. В работе предложен способ такого утолщения, разработана установка, проведен расчет и эксперименты.

***Материалы и методы.*** Разработано лабораторное оборудование, позволяющее одновременно выполнять утолщение двух кромок, которые подлежат сварке. Основным элементом этого оборудования является стальной валик, который прокатывается по кромкам двух заготовок и создает их утолщение за счет пластической деформации. Эта же установка может быть использована и для процесса сварки трением с перемешиванием. Для расчёта геометрии утолщённых кромок и параметров деформирующего ролика, зависящих от величины осадки кромок, разработана математическая модель на основе контактной задачи для упругого (ролик) и упругопластичного (заготовки) тел с билинейным законом упрочнения. Построена трехмерная упрощенная геометрическая модель установки, которая учитывает ее симметрию. На поверхностях контакта выбраны специальные контактные конечные элементы и произведено сгущение конечноэлементной сетки. Численная реализация модели осуществлена в пакете ANSYS.

***Результаты исследования.*** Теоретическая модель позволяет оценивать напряжённо-деформированное состояние взаимодействующих элементов. На основе разработанной конечноэлементной модели проведены расчеты параметров утолщенных кромок и определена геометрия утолщённых кромок. На разработанном лабораторном оборудовании проведены натурные эксперименты по утолщению кромок заготовок. Результаты эксперимента подтверждают адекватность разработанной теоретической модели и расчетов на ее основе. Показана возможность регулирования размеров утолщённых кромок.

***Обсуждение и заключение.*** Предложена технология получения утолщённых кромок в местах выполнения сварных швов, которая позволит снизить металлоёмкость конструкций и обеспечить несущую способность сварных соединений не ниже аналогичных характеристик основного металла. Разработана теоретическая модель процесса и проведен численный эксперимент, позволяющие выбрать параметры технологического процесса.

***Ключевые слова:*** сварка трением с перемешиванием, утолщённые кромки, компьютерная модель, геометрия и размеры кромок, несущая способность сварных соединений.

***Для цитирования:*** Технология и оборудование получения утолщённых кромок под сварку трением с перемешиванием / Ю. Г. Людмирский, А. Н. Соловьёв, М. В. Солтовец [и др]. // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 163–170. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-163-170





## Technology and equipment for friction stir preweld edge preparation

**Y. G. Lyudmirsky[1], A. N. Soloviev[1], M. V. Soltovets[1], R. R. Kotlyshev[2], I. V. Mironov[2]A. V. Kramskoy[3]**
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Main certification body for welding production in the Southern Region (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[3] Atommash Branch of AEM-technology JSC (Volgodonsk, Russian Federation)

***Introduction.*** Friction stir welding is widely used due to certain advantages of this method. Factors that reduce the strength of joints made of high-strength aluminum alloys are considered. When welding flat sheets, an effective way to increase the strength of the weld is edge thickening. The paper proposes a method for such thickening. A device is developed, calculations and experiments are carried out.

***Materials and Methods.*** Laboratory equipment has been developed to provide simultaneous thickening of two edges to be welded. The main component of this equipment is a steel roller, which is rolled along the edges of two blanks and thickens them due to plastic deformation. The same setup can be used for the friction stir welding process. To calculate the geometry of the thickened edges and the parameters of the deforming roller depending on the value of the edge settlement, a mathematical model based on the contact problem for elastic (roller) and elastoplastic (blank) bodies with a bilinear hardening law has been developed. A three-dimensional simplified geometric model of the facility with account of its symmetry has been constructed. On the contact surfaces, special contact finite elements were selected and the finite element mesh was refined. The numerical implementation of the model was carried out in the ANSYS package.

***Results.*** The theoretical model provides assessing the stress-strain state of interacting elements. On the basis of the developed finite element model, the parameters of the thickened edges are calculated, and the geometry of the thickened edges is defined. Using the developed laboratory equipment, full-scale experiments on thickening the edges of the blanks were carried out. The experimental results confirm the adequacy of the developed theoretical model and calculations based on it. The possibility of adjusting the size of the thickened edges is shown.

***Discussion and Conclusion.*** A technology for obtaining thickened edges in places of welds is proposed. It will reduce the metal consumption of structures and ensure the bearing capacity of welded joints not lower than similar characteristics of the base metal. A theoretical model of the process is developed, and a numerical experiment providing the selection of the process parameters is carried out.

***Keywords:*** friction stir welding, thickened edges, computer model, geometry and dimension of edges, bearing capacity of welded joints.

***For citation:*** Y. G. Lyudmirsky, A. N. Soloviev, M. V. Soltovets, et al. Technology and equipment for friction stir preweld edge preparation. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 163–170. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-163-170

**Введение.** О высоком уровне механических свойств соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), и о преимуществах этого способа сварки сообщают многие исследователи1 [1–5]. Вопросы, связанные с расчетом температурных полей при СТП рассматриваются в работе [6]. Однако, при СТП алюминиевых сплавов, высокая прочность которых достигнута термообработкой или упрочняющей деформацией, прочность сварных соединений составляет 0,78–0,94 прочности основного металла2 [7, 8]. В этих случаях компенсировать недостающую прочность возможно увеличением толщины металла в местах сварных швов или введением коэффициента запаса прочности. Последнее увеличивает вес конструкции и, соответственно, делает её неэкономичной. Обзор последних исследований, посвященных зависимости механических и микроструктурных свойств сварных швов при СТП с использование охлаждения, представлен в работе [9]. В работах [10, 11] рассматривается оптимизация процесса СТП при соединении алюминиевых сплавов. Влияние криогенной обработки и отжига на микроструктуру шва при СТП рассматривается в работе [12]. Способы достижения повышенной прочности соединения исследуются в работе [13]. Исследование влияния осевой силы при СТП рассматривается в работе [14]. Теоретические и экспериментальные исследования СТП соединения разнородных материалов и влияние не его прочность технологических параметров процесса рассматриваются в работах [15, 16].

Существуют несколько способов утолщения кромок в местах сварки. Их получают механическим или химическим фрезерованием[3,4], путём искусственного утонения основного металла, за исключением зоны, где

[1] Сергеева, Е. В. Сварка трением с перемешиванием в мировом кораблестроении. Современный уровень развития, перспективы, оборудование / HSC Consulting. URL : WWW.sergeev-hsc.de (дата обращения 12.09.2011).

[2] Технологии. Свойства соединений, полученных СТП сайт. / РЕФ.РФ. URL: http://referatwork.ru/category/tehnologii/view/492395_svoystva_soedineniy_poluchennyh_stp (дата обращения 20.08.2018)

[3] Химическое фрезерование (контурное травление) сайт. / МегаОбучалка. URL: http://megaobuchalka.ru/6/52594.html . (дата обращения 01.12.2017)

производится соединение сваркой. Однако, эти операции приводят к уменьшению коэффициента использования материала до 0,5–0,7 и увеличению стоимости конструкции. К тому же эти процессы весьма трудоемки.

Иногда утолщение свариваемых кромок получают путём наплавки, что приводит к появлению высоких остаточных напряжений, увеличению сварочных деформаций и снижению эффективности применения высокопрочных сплавов[5].

Целью данной работы является разработка и апробация технологии утолщения кромок под СТП, которая позволит увеличить коэффициент использования материала, снизить трудозатраты, увеличить несущую способность сварных соединений до уровня основного металла и повысить усталостную прочность соединений.

**Материалы и методы.** К геометрии утолщенных кромок, показанных на рис. 1, предъявляются следующие требования.

Во-первых, высота утолщения кромок *h* должна компенсировать недостающую прочность сварного соединения, вызванную утонением сварного шва заплечиками инструмента и разупрочнением сплавов в зоне термического влияния. Обычно, для высокопрочных алюминиевых сплавов эта величина составляет 10–25 % от прочности основного металла. В связи с этим *h*= (0,1–0,25) S, где S — толщина основного металла.

Во-вторых, ширина утолщения кромок *b* должна быть больше диаметра заплечиков инструмента для СТП.

В-третьих, ширина зоны пластических деформаций *B*, как показано на рис. 1, должна перекрывать зону термического влияния, образующуюся при СТП.

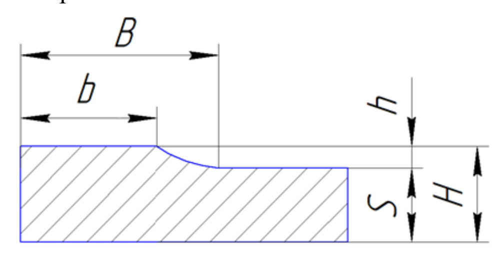



Рис. 1. Геометрия утолщённых кромок: S—толщина металла; B —ширина зоны пластической деформации; b — ширина утолщения кромок; h — высота утолщения кромок

Процесс утолщения свариваемых кромок предлагается выполнять путём холодной прокатки. На рис. 2 показана схема установки для одностороннего утолщения одновременно двух кромок, которые подлежат сварке. Причем эту операцию можно выполнять на том же оборудовании, на котором впоследствии будет выполняться сварка.

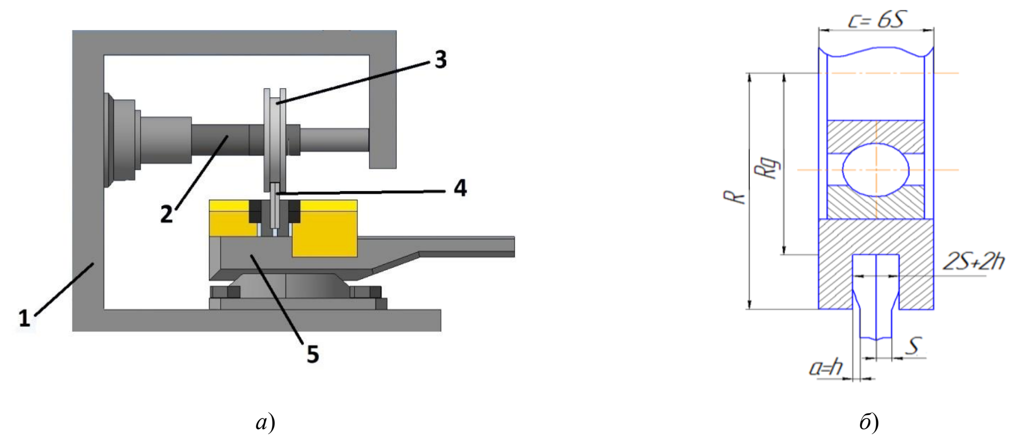



Рис. 2. Установка для утолщения кромок под СТП: *а* — общий вид установки; *б* — схема утолщения кромок

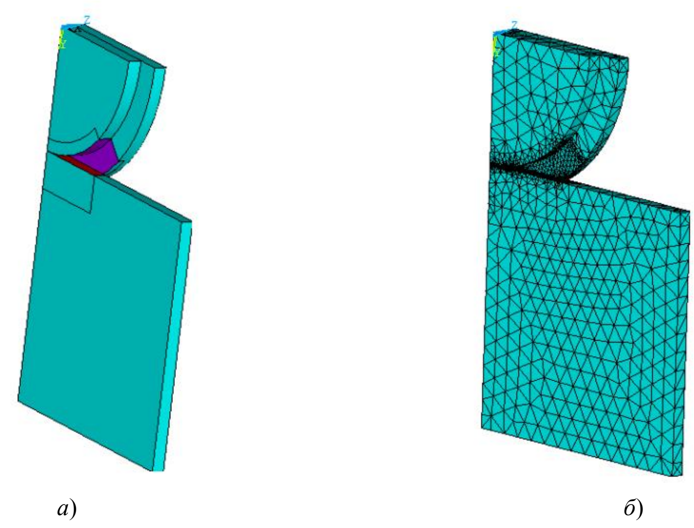
Установка для утолщения свариваемых кромок состоит из универсально-фрезерного станка 1, на скалке 2 которого установлен деформирующий ролик 3. На столе станка размещены тиски 5, в которых закреплены одновременно две заготовки 4, кромки которых подвергают утолщению. Установка работает следующим образом. Утолщаемые заготовки устанавливают вдоль ручья деформирующего ролика. Подъёмом

[4] Караченков Е.М. Повышение качества корпусных деталей ракетно-космической техники: автореферат дис. ... к-та техн. наук/ Е. М. Караченков; Гос. космич. научно-производ. центр им. М. В. Хруничева. Москва, 2000. 23 с.

[5] Повышения усталостной прочности сварных соединений / Г. И. Капырин, Л. В. Грищенко, С. А. Куркин [и др.]. №1810924/25-27; заявл. 18.07.1972; опубл. 25.08.1973, Бюл. № 31. 2 с.

стола создают заданную величину осадки кромок Δ. Включают перемещение стола вдоль ручья ролика. При этом происходит осадка свариваемых кромок на величину Δ по всей длине заготовок.

Для расчёта геометрии утолщённых кромок и параметров деформирующего ролика, зависящих от величины осадки кромок Δ, разработана компьютерная модель, которая работает в конечно-элементном пакете ANSYS. Рассматривается контактная статическая задача о вдавливании ролика в заготовки (рис. 2 *б*). В силу симметрии задачи, рассматривается упрощенная конструкция (рис. 3 *а*), которая получается рассечением исходной двумя вертикальными плоскостями (плоскость между заготовками и плоскость, проходящая через ось ролика), на которых задаются условия симметрии, и одной горизонтальной (плоскость проходящая через ось ролика) на ней задается вертикальное смещение (осадка кромок заготовок).



*а*) *б*)

Рис. 3. Модель контактного взаимодействия ролика с заготовкой:

*а* — геометрическая модель; *б* — конечно-элементная модель

В разработанной модели используется линейно-упругий материал для деформирующего ролика и билинейный упругопластический материал без упрочнения — для алюминиевой заготовки. Поверхности возможного контакта выделены (рис. 3 *а*), на них задаются контактные элементы и конечно-элементная сетка сгущена (рис. 3 *б*). Модель позволяет оценить напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов конструкций в упругой и пластической областях, а также определить геометрию утолщённых кромок.

Исходными данными для работы модели являются:

— величина осадки свариваемых кромок Δ, мм;
— толщина свариваемых заготовок *S, мм*;
— ширина утолщения кромок $b \geq d/2$, *мм*, где *d* — диаметр заплечиков;
— величина зоны пластических деформаций $B \geq T/2$, где *T* — зона термического влияния при СТП, мм;
— величина утолщения кромок $h = (0{,}1–0{,}25)\ S$, *мм*;
— толщина подготовленных под сварку кромок $H=S+h$, *мм*;
— радиус деформирующего ролика $R_д \geq 70$ *мм*;
— наружный радиус ролика $R_0 = R_д + B$, *мм;*
— зазор между боковыми поверхностями ролика и заготовками $\alpha = (0{,}1…0{,}25)\ S$, *мм*;
— ширина ролика $C = 6S$, *мм;*
— модуль упругости алюминиевой заготовки $E = 0{,}7 \cdot 10^5$, МПа;
— модуль упругости стального деформирующего ролика $E = 2{,}1 \cdot 10^5$, МПа;
— коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}33$;
— предел прочности основного металла $\sigma_b$=390 МПа;
— предел текучести основного металла, $\sigma_T$=175МПа.

**Результаты исследования.** О геометрии утолщенных кромок в результате их осадки на величину Δ можно судить по картине распределения осевых смещений в деформируемых кромках. В таблице 1 представлены распределение напряжений в заготовках толщиной 4,0 мм, геометрия и размеры утолщённых кромок при разной степени их осадки.

Таблица 1

Распределение поперечных смещений на деформированных заготовках толщиной 4,0 мм и геометрия утолщённых кромок при разной степени их осадки

| Распределения поперечных смещений в заготовках при осадке кромок | Геометрия и размеры утолщённых кромок, мм | Величина осадки кромок Δ, мм |
|---|---|---|
| | | 0,1 |
| | | 0,3 |
| | | 0,5 |
| | | 0,8 |
| | | 1,2 |

В таблице 2 приведены параметры, характеризующие геометрию утолщенных кромок при разной степени их осадки Δ.

Таблица 2

Размеры утолщенных кромок в зависимости от степени их осадки

| Расчетные параметры утолщенных кромок, мм | Величина осадки кромок Δ, мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,5 |
| Высота утолщенных кромок *h* | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Ширина зоны пластической деформаций *B* | 4,8 | 7,5 | 10,4 | 13,1 | 15,6 | 17,8 |
| Ширина утолщённой кромки *b* | 0 | 0,25 | 1,2 | 3,8 | 6,2 | 8,65 |
| *B-b* | 4,8 | 7,25 | 9,2 | 9,3 | 9,4 | 9,15 |

По данным, представленным в таблице 2, построены зависимости B и b от Δ, показанные на рис. 4.

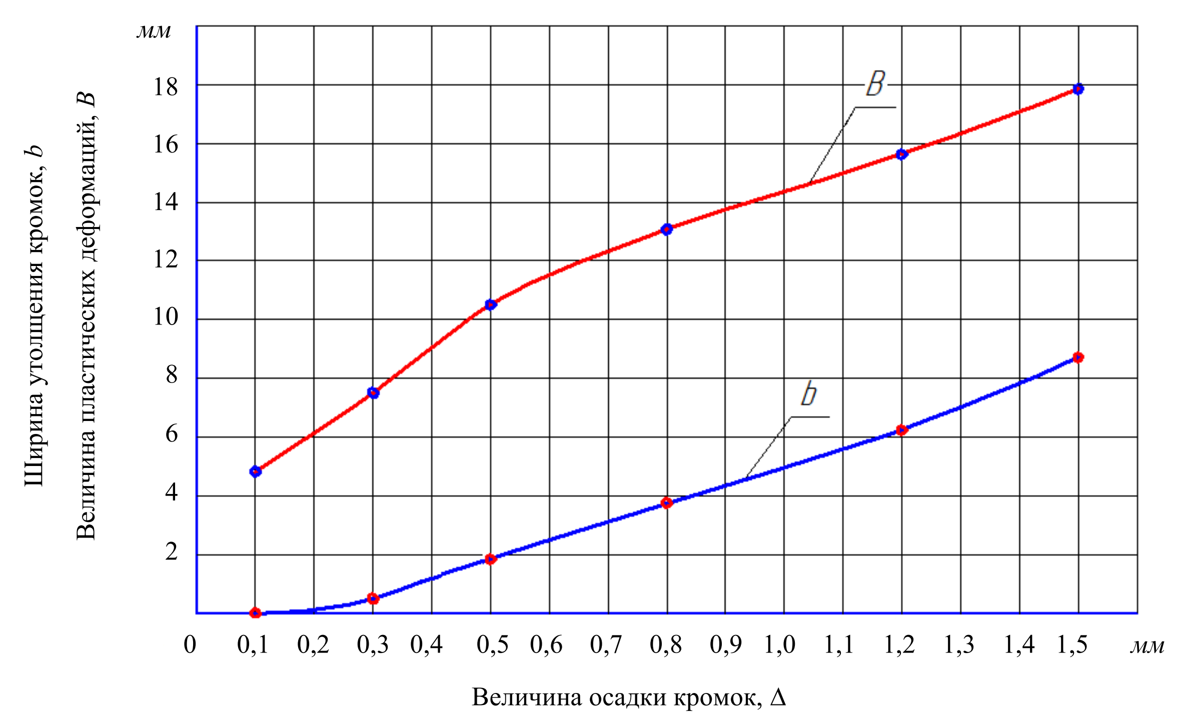
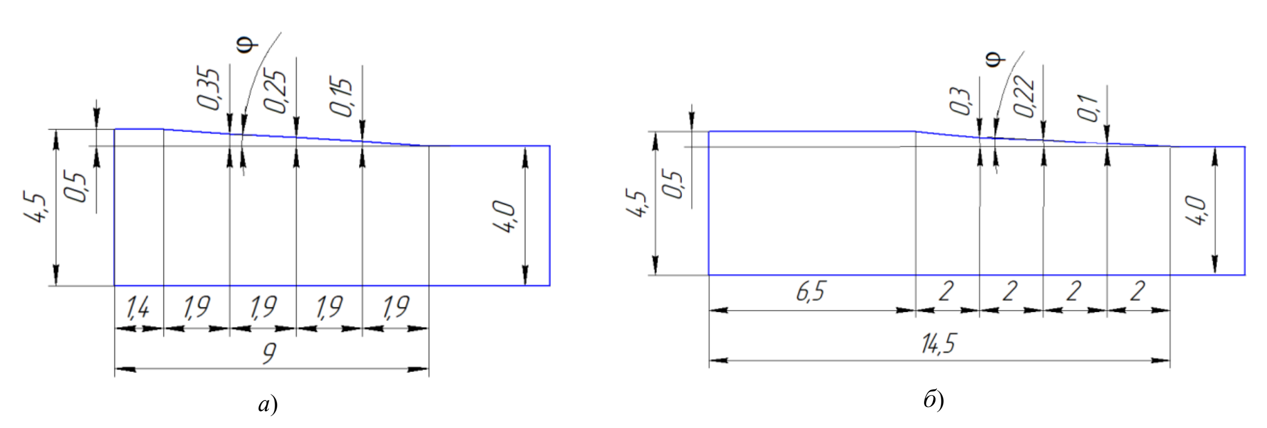



Рис. 4. Ширина утолщенных свариваемых кромок *b* и зона пластических деформаций *B* в зависимости от величины осадки кромок Δ

Следует обратить внимание на то, что при Δ≥0,5 величина (*B-b)* практически одинакова и приблизительно равны 9,2 мм. При таких размерах угол подхода сварного соединения к основному металлу φ менее 1 градуса. В связи с этим, коэффициент концентрации напряжений стремится к единице. Это позволяет утверждать, что сварные соединения, выполненные СТП по утолщенным кромкам, будут иметь высокие показатели сопротивляемости к зарождению и развитию разрушения.

Для проверки адекватности модели расчёта утолщения кромок, использующую МКЭ, определили её согласованность с практикой. Для этого на вышеописанном оборудовании были получены утолщённые кромки при их осадке на 0,5 и 1,2 мм. Профиллограммы утолщённых кромок, полученные на двухкоординатном измерительном приборе ДИП-6, представлены на рис. 5.




*а*) *б*)

Рис. 5. Геометрия утолщенных кромок после их осадки на величину: *а* — 0,5 мм; *б* — 1,2 мм

Видно, что размеры утолщённых кромок, полученные расчётным путём с использованием МКЭ, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расхождение не превышает 15 %.

**Обсуждения и заключение.** В работе предложена новая технология получения утолщённых кромок в местах выполнения сварных стыковых соединений. Разработана лабораторная установка, которая реализует предложенный метод. Основным элементом этой установки является осаживающий ролик, который действует на кромки свариваемых элементов и за счет пластической деформации вызывает утолщение этих кромок. Экспериментально исследована зависимость ширины утолщенной части в зависимости от осадки ролика. Для выбора этой осадки, при заданной ширине утолщения для различных по геометрии и механическим свойствам материалов, разработана математическая модель процесса деформирования. Эта модель реализована в конечно-элементном пакете ANSYS. Для рассматриваемого в работе материала и геометрии проведен численный эксперимент, результаты которого согласуются с данными эксперимента и подтверждают адекватность предложенной модели. Таким образом, подтверждена предложенная технология, позволяющая снизить металлоемкость конструкций и обеспечить прочность соединений не ниже прочности основного металла. Разработанная расчетная модель процесса утолщения кромок позволяет находить величину осадки деформирующего ролика для создания необходимой ширины утолщения.

**Библиографический список**


1. Сварка трением с перемешиванием — плюсы и минусы / В. А. Фролов, А. Н. Иванюхин, А. Н. Сабанцев [и др.] // Сварочное производство. — 2008. — №10. — С. 12–19.

2. Pengfei Yu. Analysis and characterization of dynamic recrystallization and grain structure evolution in friction stir welding of aluminum plates / Yu. Pengfei, Wu. ChuanSong, Lei Shi // Acta Materialia. — 2021. — Vol. 207. — P. 116692. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116692

3. Defalco, J. Friction stir welding vs. fusion welding / J. Defalco // Welding J. — 2006. — Vol. 85 (3). — P. 42–44.

4. Okamura, H. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // J. of Jap. Institute of Light Metals. — 2000. — Vol. 50 (4). — P. 166–172. https://doi.org/10.2464/jilm.50.166

5. Лукьянов, В. Ф. Производство сварных конструкций (изготовление в заводских условиях) / В. Ф. Лукьянов, В. Я. Харченко, Ю. Г. Людмирский. — Ростов-на-Дону : Терра Принт, 2006. — 336 с.

6. Котлышев, Р. Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / Р. Р. Котлышев, Л. Г. Шучев, А. В. Крамской // Вестник Донского государственного технического университета. — 2010. — Т. 10, №5 (48). — С. 693–699.

7. Котлышев, Р. Р. Сварка трением с перемешиванием / Р. Р. Котлышев: моногр. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. — 135 с.

8. Покляцкий, А. Г. Сварка трением с перемешиванием –эффективный способ повышения эксплуатационных характеристик конструкций / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, В. Е. Федорчук // Автоматическая сварка. — 2010. — № 4. — С. 45–50.

9. Virendra Pratap Singh. Mechanical and microstructural properties evolutions of various alloys welded through cooling assisted friction-stir welding: A review / Virendra Pratap Singh, Surendra Kumar Patel, Basil Kuriachen // Intermetallics. — 2021. — Vol. 133. — P. 107122. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107122

10. Mrinal Sahu. Optimization of process parameters of friction stir welded joints of marine grade AA 5083 / Mrinal Sahu, Atanu Paul, Subhas Ganguly // Materials Today: Proceedings. 2021. — Vol. 44(2). — P. 2957–2962. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.938

11. Optimization of friction stir welding parameters during joining of AA3103 and AA7075 aluminium alloys using Taguchi method / Anil Raj, J. Pratap Kumar, Anil Melwin Rego [et al.] // Materials Today: Proceedings, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.246

12. Effects of cryogenic and annealing treatment on microstructure and properties of friction stir welded TA15 joints / Xianglai Xu, Xueping Ren, Hongliang Hou, Xian Luo // Materials Science & Engineering A. — 2021. — Vol. 804. — P. 140750. https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140750

13. High-strength joint of nuclear-grade FeCrAl alloys achieved by friction stir welding and its strengthening mechanism / Yanying Hu, Yunqiang Zhao, Yongbing Peng [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2021. — Vol. 65. — P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.007

14. An investigation of the impact of axial force on friction stir-welded AA5086/AA6063 on microstructure and mechanical properties butt joints / R. Ramamoorthi, K. P. Yuvaraj, C. Gokul [et al.] // Materials Today: Proceedings. — 2021. — Vol. 37 (2). — P. 3159–3163. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.050

15. Sucharitha, M. Experimental investigations on the effect of tool rotational speed on mechanical properties and microstructure of friction stir welded AZ31 Mg alloy / M. Sucharitha, B. Ravi Sankar, P. Umamaheswarrao // Materials Today: Proceedings, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.788

16. Kareem N. Salloomi. Coupled Eulerian-Lagrangian prediction of thermal and residual stress environments in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys / Kareem N. Salloomi, Sanaa Al-Sumaidae // Journal of Advanced Joining Processes. — 2021. — Vol. 3. — P. 100052. https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100052

Поступила в редакцию 22.03.2021
Поступила после рецензирования 05.04.2021
Принята к публикации 09.04.2021

*Об авторах:*

**Людмирский Юрий Георгиевич**, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0639-2597, lyudmirskiy40@mail.ru

**Соловьев Аркадий Николаевич,** заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID H-7906-2016, ScopusID 55389991900, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554, Solovievarc@gmail.com.

**Солтовец Марат Васильевич**, доцент кафедры «Технология технического регулирования» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент

**Котлышев Роман Рефатович**, заместитель директора ООО «Головной орган по сертификации сварочного производства Южного Региона» (346715, РФ, Ростовская область, х. Камышеваха, улица Светлая, 2В), кандидат технических наук, kotlyshev@mail.ru

**Миронов Игорь Владимирович,** инженер ООО «Головной орган по сертификации сварочного производства Южного Региона» (344018, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Народного Ополчения, д. 213), mironov_igor_1993@mail.ru

**Крамской Александр Владимирович**, ведущий инженер-технолог по сварке, филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск (347360, РФ, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Жуковское шоссе, д. 10), кандидат технических наук ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0668-9518, ingenersvarka@yandex.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Ю. Г. Людмирский — постановка проблемы, разработка схемы лабораторной установки, подготовка текста. А. Н. Соловьев — разработка математической и компьютерной модели, проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов. М. В. Солтовец — создание лабораторной установки, проведение эксперимента. Р. Р. Котлышев — создание лабораторной установки, анализ результатов исследований. И. В. Миронов — создание лабораторной установки, обсуждение результатов. А. В. Крамской — создание лабораторной установки, обсуждение результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Advanced Engineering Research 2021. Т. 21, № 2. С. 171−183. ISSN 2687−1653*

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
# MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE






УДК 621.876.11 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-171-183

## Совершенствование программы технического обслуживания пассажирских лифтов на основе имитационного моделирования режимов их работы



**Д. С. Апрышкин[1], Г. Ш. Хазанович[1], В. О. Гутаревич[2]**
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк, Донецкая Народная Республика)

***Введение.*** Лифты в жилых и общественных зданиях относятся к средствам вертикального транспорта и являются сложными электромеханическими устройствами повышенной опасности. Поэтому все стадии их жизненного цикла строго лимитируются нормативными документами. Необходимые уровни безопасности и комфортности обеспечиваются за счет обоснованного выбора основных параметров и постоянного поддержания системы в исправном состоянии. Главными факторами, от которых зависит выполнение нормативных требований в процессе эксплуатации лифтовой установки, являются качество изготовления ответственных узлов, уровень реальной загруженности с учетом фактической величины отработанного ресурса и реализуемая программа технического обслуживания (ТО). В настоящее время при установлении периодичности ТО лифтов не принимаются во внимание такие характеристики, как плотность заселения, уровень силовых нагрузок, реальное время работы лифта и количество включений главного привода. Целью данной работы является научное обоснование концепции и методики разработки программы ТО конкретных лифтовых установок на базе исследований уровня и режима нагружения несущих узлов.

***Материалы и методы.*** В работе обосновано использование методики имитационного моделирования для оценки уровня загруженности силовых узлов лифтовой установки и ее кинематических показателей в условиях действия многочисленных случайных воздействий. Разработка показателя, характеризующего комплексный режим работы лифта с учетом совместного влияния уровня отработки ресурса, чистого времени функционирования, числа включений, силовой нагруженности узлов, потребовала применения экспертного метода. Заключительная часть программы исследования — формирование конкретных рекомендаций по периодичности ТО лифтов — выполнена на основе ранжирования частных показателей.

***Результаты исследования***. Особенности действия лифтовой установки заключается в том, что продолжительность обслуживания заявки является функцией многих случайных переменных. Математические модели формирования силовых воздействий базируются на представлении электромеханического лифта как динамической системы с одной степенью свободы. Получены выражения для расчета статических натяжений тяговых канатов и моментов на валу двигателя. Решена задача динамики, определены нагрузки, значения которых являются основой для выполнения имитационного моделирования режимов работы лифтовой установки.

***Обсуждение и заключения.*** Обоснование регламента ТО пассажирских лифтов является актуальной задачей, решение которой определяет уровень безопасности и комфортности пассажиров. В настоящее время нормативами на проектирование и эксплуатацию лифтовых установок программы технического обслуживания по частоте проведения не увязываются с уровнем нагрузки и величиной отработки ресурса. В статье дается общая постановка задачи и методика формирования комплексного показателя эквивалентной нагрузки. Приводятся математические модели для расчета силовых и временных нагрузок лифта с учетом характера многочисленных случайных воздействий.

***Ключевые слова:*** лифт пассажирский, случайные воздействия, математические модели функционирования, динамические нагрузки, режим силового нагружения, распределение случайных факторов, кинематические показатели, имитационное моделирование, комплексный показатель загруженности, программа технического обслуживания.

***Для цитирования:*** Апрышкин, Д. С. Совершенствование программы технического обслуживания пассажирских лифтов на основе имитационного моделирования режимов их работы / Д. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович, В. О. Гутаревич // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 171–183. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-171-183



## Improving the maintenance program for passenger elevators based on simulation of their operating modes

**D. S. Apryshkin[1], G. Sh. Khazanovich[1], V. O. Gutarevich[2]**
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2]Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic)

***Introduction.*** Elevators in residential and public buildings are the means of vertical transport. An elevator is one of the complex electromechanical devices of increased danger. Therefore, all stages of its life cycle are strictly limited by regulatory documents. The desired levels of safety and comfort are provided through the reasonable choice of the basic parameters and a constant maintenance of the system in good condition. The key factors that affect the implementation of regulatory requirements during the operation of the elevator installation are the quality of manufacturing of critical components, the level of real workload, taking into account the actual value of the spent resource, and the implemented maintenance program. Currently, when determining the maintenance schedule for elevators, such characteristics as the density of occupancy, the level of power loads, the actual operating time of the elevator and the counts of starts of the main drive are not taken into account. This study objective is the scientific rationale of the concept and methodology for developing the program of maintenance of specific elevator installations on the basis of studies of the level and mode of loading of load-bearing units.

***Materials and Methods.*** The use of simulation modeling techniques to assess the load level of power units of an elevator installation and its kinematic indicators under the action of numerous random impacts is validated in the paper. The development of an indicator that characterizes the complex mode of elevator operation, taking into account the joint influence of the level of resource development, net operating time, number of starts, and the power load of the nodes, required the application of an expert method. The final part of the research program is the formation of specific recommendations on the maintenance schedule of elevators. It is based on the ranking of particular indicators.

***Results.*** The performance feature of the elevator installation is that the service time of a customer is a function of many random variables. Mathematical models of the formation of force impacts are based on the representation of an electromechanical elevator as a dynamic one-degree-of-freedom system. Expressions for calculating the static tension of traction ropes and torques on the motor shaft are obtained. The problem of dynamics is solved. The loads whose values are the basis for performing simulation modeling of the operating modes of the elevator installation are determined.

***Discussion and Conclusions.*** Feasibility of the regulations for the maintenance of passenger elevators is an urgent task, the solution to which determines the level of safety and comfort of passengers. Currently, the standards for the design and operation of elevator installations do not link the frequency of maintenance programs with the level of load and the amount of resource development. The paper provides a general statement of the problem and a methodology for the formation of a complex factor of the equivalent load. Mathematical models are given for calculating the power and temporary loads of the elevator, taking into account the nature of numerous random impacts.

***Keywords***: passenger elevator, random impacts, mathematical models of functioning, dynamic loads, power loading mode, distribution of random factors, kinematic indicators, simulation, complex load factor, maintenance program.

***For citation:*** D. S. Apryshkin, G. Sh. Khazanovich, V. O. Gutarevich. Improving the maintenance program for passenger elevators based on simulation of their operating modes. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 171–183. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-171-183

***Введение.*** Согласно основному нормативному документу[1], лифт — это устройство, предназначенное для перемещения людей и (или) грузов с одного уровня на другой в кабине, движущейся по жестким направляющим, у которых угол наклона к вертикали составляет не более 15°. Лифт является уникальным

[1]Технический регламент Таможенного союза. Безопасность лифтов / Решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 824 (ред. от 19.12.2019) «О принятии технического регламента Таможенного союза «Безопасность лифтов». URL: https://docs.cntd.ru/document/902307835/ (дата обращения: 11.06.2021).

транспортным средством массового пользования. Им управляет сам пассажир или персонал, которому не требуется высокой квалификации [1] Поэтому лифт должен отвечать всем требованиям безопасности и комфортности при перевозке пассажиров. Лифт относится к числу сложных электромеханических устройств повышенной опасности [2]. К проектированию, изготовлению, монтажу и техническому обслуживанию лифтов в процессе эксплуатации предъявляются жесткие требования, сформулированные в Техническом регламенте и других нормативных документах. В зависимости от типа привода лифты бывают электромеханические и гидравлические [3]. В электромеханических лифтах в качестве подъемного механизма применяется привод, состоящий из электродвигателя, редуктора и канатоведущего шкива (рис. 1), а в гидравлических — гидропривод поступательного действия.

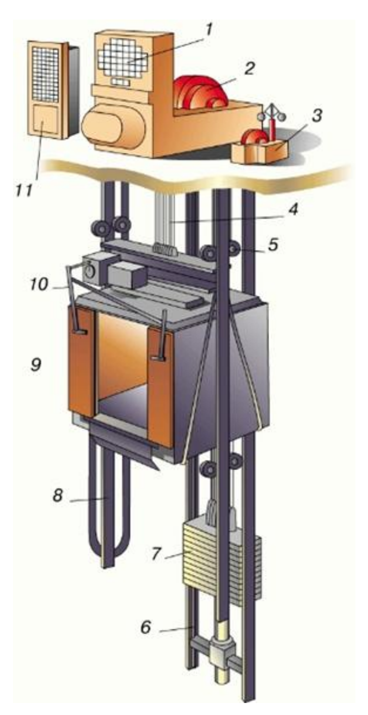



Рис. 1. Конструкция лифта с электромеханическим приводом: 1 — электродвигатель; 2 — лебедка; 3 — ограничитель скорости; 4 — тяговые канаты; 5 — направляющие ролики кабины; 6 — направляющие противовеса; 7 — противовес; 8 — направляющие кабины; 9 — кабина; 10 — дверной механизм; 11 — пульт управления

Наибольшее распространение в современных многоэтажных зданиях получили лифты с электромеханическим приводом [4]. В настоящей статье предметом исследования являются лифты с редукторным электромеханическим приводом.

В конце 2020 года, согласно информации Национального лифтового союза, в Российской Федерации насчитывалось более 500 тыс. лифтов, эксплуатируемых в жилом фонде и различных учреждениях[2]. Порядка 160 тыс. из них отработали свой установленный нормативный срок, но продолжают эксплуатироваться. С каждым годом увеличивается количество новых многоэтажных строений по всей стране, что приводит к росту фонда лифтового оборудования.

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к лифтовому оборудованию, являются безопасность и комфортность пассажиров, которые могут быть обеспечены за счет правильного выбора параметров вертикальной транспортной установки и постоянного поддержания лифта в исправном состоянии [4–5].

На показатель безопасности лифта основное влияние оказывают следующие группы факторов:

— качество изготовления лифтового оборудования;

— уровень загруженности несущих элементов и его соответствие нормативным значениям с учетом величины отработанного ресурса;

— реализуемая программа технического обслуживания.



[2] Данные Национального лифтового союза РФ / URL: http://www.lift.ru/index.php/ru/ebiblio.html (дата обращения: 11.05.2021).

Безопасность лифта[3] характеризуется общепринятыми показателями: наработка на отказ, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности.

Показатель «транспортная комфортность» введен национальным стандартом[4]. Он характеризует интервал движения лифтов, выраженный в виде периода времени между двумя последовательными отправлениями кабины лифта в заданном направлении на основном посадочном этаже, на котором входящие в здание люди имеют доступ к лифтам. Таким образом, уровень комфортности — это условное время ожидания пассажиром очередного рейса. Отметим, что показатель транспортной комфортности является случайной величиной и, естественно, в реальных условиях изменяется от минимального до максимального значения. Наиболее представительной величиной показателя комфортности может являться средняя величина в различные периоды суточной эксплуатации.

Обратимся к программам технического обслуживания лифтов. Периодичность ТО лифтового оборудования устанавливается исходя из двух основных документов: паспорта оборудования и «Правил…»[5]. Периодичность принята одинаковой для всех объектов лифтового хозяйства.

В последние годы выполнен ряд фундаментальных исследований в России [4–6][6][7][8] и за рубежом [7–10], относящихся к обеспечению надежности и безопасности лифтового оборудования. Следует отметить, что в рассмотренных работах при установлении периодичности ТО лифтов не принимаются во внимание такие параметры, как плотность заселения этажей и квартир, а также уровень силовых нагрузок, реальное время работы лифта, количество включений главного привода в единицу времени.

Несмотря на одинаковую этажность, идентичный тип и количество лифтов аналогичные строения могут значительно отличаться по количеству проживающих, а также по степени эксплуатации лифтового оборудования. Это оказывает существенное влияние на чистое время работы, эквивалентные нагрузки, испытываемые лифтовым оборудованием, что изменяет реальный темп отработки ресурса, срок службы каждого комплекта лифтового оборудования. При этом плановый назначенный срок службы их будет одинаков.

Важно отметить, что в нормативных[3,4,5] и литературных отечественных [6][6,7,8] и зарубежных [7–10] источниках к настоящему времени отсутствуют определение и рекомендации по применению критериев загруженности лифтов. Нет также аналитических и инженерных методов проектирования программ ТО лифтов в разработках научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций. Отсутствие методической базы по проектированию системы и программы ТО лифтов приводит в одних случаях к превышению необходимого объема ремонтных воздействий с одновременным ростом затрат, в других — к необоснованному увеличению межремонтного интервала. Это сказывается на снижении показателей надежности и в целом на безопасности при эксплуатации лифтовых установок.

Для поддержания уровня безопасности и комфортности лифтовых установок при необходимом и достаточном уровне ремонтных воздействий в настоящей работе предусматриваются исследования в следующих направлениях:

— использование имитационного моделирования для установления реальных эквивалентных нагрузок и режимов работы;

— обоснование комплексного показателя, с помощью которого можно сформировать оценку уровня нагруженности силовых элементов лифта;

— разработка рекомендаций по периодичности обслуживания лифтов как в уже эксплуатируемых, так и в проектируемых зданиях.

Это позволит контролировать правильность принятых проектных решений (прежде всего по параметрам главного привода), за счет эффективной организации ТО снизить вероятность возникновения отказов в работе оборудования.

Следует отметить, что при моделировании лифтовых установок, находящихся в эксплуатации, можно использовать кинематические показатели режима, полученные в результате наблюдений диспетчерских служб:

[3] Национальный стандарт Российской Федерации. Лифты. Общие требования безопасности при эксплуатации : ГОСТ Р 55964-2014 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва : Стандартинформ, 2019. 16 с.

[4] Национальный стандарт Российской Федерации. Лифты пассажирские. Проектирование систем вертикального транспорта в жилых зданиях : ГОСТ Р 52941-2008 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва : Стандартинформ, 2008. 15 с.

[5] Правила организации безопасного использования и содержания лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек) и эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах / Утверждены постановлением Правительства РФ от 24 июня 2017 года № 743. URL: https://docs.cntd.ru/document/436745439#/reg/ (дата обращения: 11.06.2021).

[6] Мечиев, А. В. Разработка путей обеспечения безопасной эксплуатации лифтов : автореф. дис. … канд. техн. наук / А. В. Мечиев. Москва, 2018. 18 с.

[7] Горожеев, М. Ю. Разработка и исследование прибора для экспресс-диагностики лифтов в процессе их эксплуатации : автореф. дис. … канд. техн. наук / М. Ю. Горжеев. Москва, 2013. 25 с.

[8] Федяев, Р. В. Методы повышения надежности лифтов и подъемников : автореф. дис. … канд. техн. наук / Р. В. Федяев. Томск, 2013. 23 с.

чистое машинное время и удельное количество включений [11]. Для этих лифтов актуальным является получение в результате моделирования данных по силовым нагрузкам.

При комплексном моделировании режимов работы проектируемых лифтов необходимо предварительно решить задачу выбора их основных параметров.

**Целью работы** является научное обоснование концепции и методики разработки программы технического обслуживания конкретных лифтовых установок на базе исследований уровня и режима нагружения основных несущих узлов в течение заданного или прогнозируемого периода эксплуатации.

**Материалы и методы. Континуальная постановка задач.** В соответствии с общей концепцией решения проблемы и для достижения цели настоящей работы определены структура задач и методическое обеспечение каждого направления. Прежде всего планируется выполнить описание объекта моделирования как системы массового обслуживания, работающей в циклическом режиме и подвергающейся случайным внешним воздействиям. Предварительно необходимо изучить совокупность случайных факторов, воздействующих на главный привод лифтовой установки.

Эффективным методическим приемом исследования закономерностей рабочих процессов в условиях случайных воздействий признано имитационное моделирование. Для реализации процедур моделирования необходимо обосновать математические модели формирования силовых воздействий на привод лифтовой установки и модели формирования распределений случайных воздействий. К основным влияющим случайным факторам отнесены число пассажиров в кабине случайного рейса, номера этажей стояния, вызова и назначения, количество остановок в период цикла, продолжительность чистого машинного времени и общей продолжительности цикла.

Предусматривается разработка алгоритмов и программ имитационного моделирования влияния важнейших факторов на величину эквивалентных нагрузок и кинематические характеристики режима работы привода лифтовой установки на основе одного из современных языков программирования.

Необходима оценка адекватности и анализ результатов имитационного и силового моделирования для построения обобщенных зависимостей влияния основных факторов на режимные показатели лифтовых установок.

Впервые предусматривается формирование концептуальных подходов к разработке программ технического обслуживания лифтового оборудования во взаимосвязи с реальными режимами его нагружения и последующей разработкой инженерной методики формирования регламента ТО лифтовой установки.

В статье даются результаты представления лифта как системы массового обслуживания, выбора показателя эквивалентной нагрузки, модели формирования силовых воздействий на вал главного привода. Другие этапы и результаты моделирования кинематических показателей и силовых режимов будут представлены в очередных номерах журнала.

**Результаты исследования. Лифт как система массового обслуживания.** Для адекватного математического описания функционирования пассажирского лифта в многоэтажном доме необходимо принять некоторые очевидные условия, определяющие его основные свойства. Каждая лифтовая установка характеризуется паспортными параметрами, определяющими условия работы и ее возможности:

— этажность дома, $N$;

— максимальная грузоподъемность, выраженная массой поднимаемого груза $Q$, кг, или количеством пассажиров, $R$;

— установившаяся скорость движения кабины (и противовеса), $v$, м/с.

Прежде всего необходимо принять, что работа лифтовой установки при перемещении пассажиров производится отдельными циклами. Каждый $i$-й цикл состоит из отдельных этапов: появление пользователей, случайное их число $r$, на случайном этаже $M$ и вызов кабины; кабина лифта по окончании предыдущего цикла находится на случайном этаже $L$; кабина перемещается при $Q=0$ в период вызова с этажа $L$ на этаж $M$; посадка $r$ пассажиров на этаже $M$ и движение на случайный этаж назначения $S$, $1 \le r \le R$; в процессе движения на участке $M \to S$ возможны случайные по числу $Y$ и расположению в здании промежуточные остановки для посадки и высадки отдельных пассажиров; высадка пассажиров на этаже назначения $S$; по окончании

перемещения кабины в i-м цикле возникает пауза случайной продолжительностью $\Delta_i$ — ожидание очередного цикла.

Из описания следует, что лифт может быть представлен как оригинальная одно- или многоканальная система массового обслуживания — СМО [12], работающая в режиме воздействия ряда случайных факторов — M, L, S, r, Y, Δ. Отличительная особенность лифтовой СМО в том, что продолжительность обслуживания заявки от момента вызова до доставки пассажира на конечный этаж назначения S является функцией многих случайных переменных. Каждые из случайных величин (M, L, S, r) являются независимыми. Функции распределения этих величин могут быть установлены либо опытным путем, либо на основе логического анализа. Отдельная задача решена для установления случайной величины — числа промежуточных остановок Y [13,14]. Известное классическое решение может быть использовано только для описания случайного времени ожидания очередного цикла Δ.

В теории СМО доказано, что, если

а) вероятность поступления очередной заявки $p_n(t)$ зависит только от промежутка времени между заявками t,

б) два события никогда не происходят в один и тот же момент времени,

в) вероятность того, что за очень малый промежуток времени Δt, выбранный в любой момент, произойдет хотя бы одно событие, то вероятность $p_n(t)$ выражается законом Пуассона [12]:

$$p_n(t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}.$$

Распределение интервала времени между двумя последовательными случайными событиями T подчиняется экспоненциальному закону, т. е.

$$P(T>\tau)=e^{-\lambda\tau},$$

где среднее значение случайной величины T равно

$$\tau_{ср}=1/\lambda.$$

Таким образом, для моделирования потока заявок, поступающих на вход одиночного лифта, можно принять экспоненциальный закон распределения интервала Δ. При этом необходимо на основе экспериментальных наблюдений или нормативных данных установить среднее время ожидания очередной заявки $\Delta_{ср}$. Решение этой задачи, а также обоснование функций распределения случайных величин *M, L, S, r,Y* приведено в работах [13, 15].

Выбор показателя эквивалентной нагрузки лифта представляет собой самостоятельную задачу. Прежде всего необходимо определить критерий, которому должен отвечать этот показатель. Этот критерий должен быть взаимосвязан с условиями назначения или изменения периодичности ТО основных узлов лифтовой установки. Главным условием является накопленный расход ресурса узла по сравнению с его нормативным значением. Очевидно, что расход ресурса узла или детали определяется двумя факторами: временны́м и силовым, т. е. показатель эквивалентной нагрузки должен учитывать распределение нагрузки во времени эксплуатации так, чтобы при увеличении длительности эксплуатации и величины воспринимаемых нагрузок эквивалентный показатель возрастал. Предлагается по аналогии с оценкой нагрузки электродвигателя при длительном режиме эксплуатации с большой частотой включений в качестве показателя эквивалентной нагрузки $M_{экв}$ принять среднеквадратическую нагрузку за весь межремонтный период эксплуатации лифта[9] с корректировкой ее путем введения в расчет относительной частоты включений.

С учетом приведенных аргументов предлагаемая математическая модель для расчета эквивалентной нагрузки силовых элементов лифта будет иметь вид:

$$M_{ЭКВ} = K(V_{RT}) \cdot \sum_{i=1}^{C} \left( \sqrt{\frac{\int_0^{t_{Bi}} M_{Bi}^2(t)dt + \int_0^{t_{ПД.i}} M_{ПД.i}^2(t)dt}{\tau_i}} \right),$$

где $M_{Bi}(t)$, $M_{ПД.i}(t)$ — соответственно моменты на валу двигателя (или в другом звене трансмиссии лифта) в функции времени *t* в суммарные периоды вызова лифта $t_{Bi}$, перемещения $t_{ПД.i}$ кабины лифта с пассажирами;

[9] Епифанов, А. П. Основы электропривода : учебное пособие / А. П. Епифанов. Санкт-Петербург : Лань, 2009. 192 с.

$\tau_i$ — продолжительность полного i-го цикла работы установки, включая продолжительность движения кабины при вызове, с пассажирами, торможении, паузах на загрузку и выгрузку пассажиров, а также ожидании очередной заявки на использование лифта, с;

*C* — общее количество циклов за заданный отрезок времени T;

$V_{RT}$ — частота циклов включения лифта за расчетный период *T*, т. е. число циклов в единицу времени, 1/ч или 1/сутки:

$$V_{RT} = \frac{C_1}{T} = \frac{C_1}{\sum_{i=1}^{C} \tau_i};$$

$K(V_{RT})$ — корректирующий коэффициент, учитывающий частоту включения лифта; пределы изменения коэффициента $K(V_{RT})_{мин} \leq K(V_{RT}) \leq 1$ устанавливаются экспертным путем.

При частотах включения привода, близких к нормативным, $K(\nu_{RT}) = 1$ При увеличении частоты включений $V_{RT}$ эквивалентная нагрузка возрастает за счет увеличения коэффициента $K(V_{RT})$;

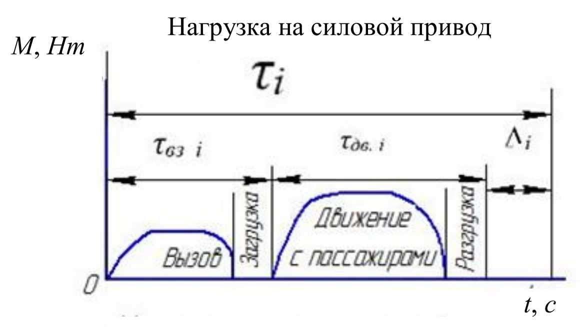
$C_1$ — число включений главного привода за расчетное время T, т. е. в периоды вызова лифта, движения с пассажирами и промежуточных остановок.

Целесообразно выделить многократно повторяющиеся массовые режимы, которые будут главным образом определять эквивалентную нагрузку за период наблюдений. Предлагается на данном этапе исследований разделить суточный период функционирования лифта в рабочие дни на четыре временных отрезка [10].

**Обоснование математических моделей формирования силовых воздействий на привод лифтовой установки.** Нагрузка *M* в период выполнения цикла работы лифта на определенном временном интервале $\tau_i$ может быть представлена случайными графиками *M(t)* для этапов вызова и движения с пассажирами (рис. 2).

Как ранее показано, за один и тот же временной интервал между ТО лифт может совершать различное количество циклов работы, которые, в свою очередь, будут иметь различные характеристики по длительности $\tau_i$ и по величине нагрузок $M_{экв}$, воспринимаемых двигателем и другими элементами лифта.

Нагрузка на силовой привод




Нагрузка на тормозной механизм

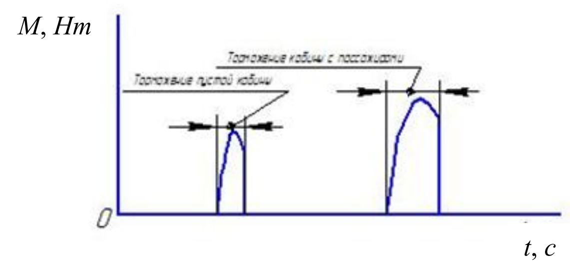



Рис. 2. Цикл работы лифта: $\tau_i$ — время цикла; $\tau_{вз.i}$ — время вызова; $\tau_{дв.i}$ — время движения с пассажирами; $\Delta_i$ — время, через которое поступает заявка на использование лифта после окончания цикла

На длительность выполнения заявки, величину нагрузки на привод и силовое оборудование лифта будут оказывать влияние случайные величины: $M_i$=1, 2 …N; $L_i$=1, 2,…N; $S_i$=1, 2,…,N, где N — этажность дома; относительный уровень загрузки лифта по грузоподъемности; $\gamma = Q_i/Q_{пасп}$, $\gamma_{мин} < \gamma < \gamma_{макс}$, где $Q_{пасп}$ — номинальная (паспортная) грузоподъемность; интервал времени ожидания $\Delta_i$.

Для того чтобы найти зависимость нагрузок на силовые узлы лифта от времени при воздействии перечисленных случайных величин, остановимся на определении нагрузок, которые испытывают силовые части лифтового оборудования.

Тяговые канаты (усилие $S_{k1}$) и канаты противовеса (усилие $S_{п1}$) в произвольный момент времени подвергаются действиям статических нагрузок в точках набегания-сбегания с канатоведущего шкива (КВШ), которые соответствуют расчетной схеме и определяются по формулам (рис. 3):

— при подъеме-спуске кабины

$$S_{k1} = \frac{(Q_i+Q_k)\cdot g \pm (F_k+F_г)}{\eta_б^2} + n \cdot q_{тк} \cdot (H - \Delta h)\cdot g; \qquad (1)$$

— при подъеме-спуске противовеса

$$S_{п1} = [Q_п \cdot g \pm F_п] \cdot \eta_б + n \cdot q_{тк} \cdot \Delta h_i \cdot g. \qquad (2)$$

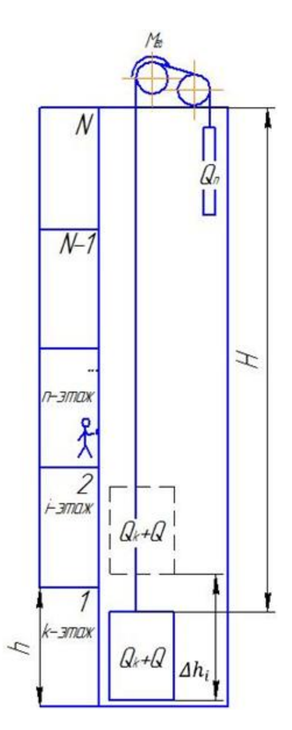



Рис. 3. Схема к расчету усилий в тяговых канатах

Знак «плюс» — при движении кабины или противовеса вверх, «минус» — при движении кабины или противовеса вниз. В формулах обозначено: $Q_i$ — масса груза в i- м цикле, кг; $Q_К$ — масса кабины, кг; $Q_П$ — масса противовеса, кг; $F_К$ — сила сопротивления движению кабины, Н; $F_Г$ — сила сопротивления движению груза, Н; $F_П$ — сила сопротивления движению противовеса, Н; $\eta_б$ — КПД блока канатной системы; $n$ — число тяговых канатов; $q_{тк}$ — погонная масса тягового каната, кг/м; $\Delta h_i$ — расстояние между уровнями первого этажа и расположения кабины с пассажирами в данный момент времени (рис. 3).

Как видно по формулам (1) и (2), натяжение ветвей тяговых канатов и канатов противовеса в точках набегания-сбегания с КВШ напрямую зависит от следующих факторов:

— направления перемещения кабины и, соответственно,0 противовеса;

— расстояния $\Delta h_i$,определяющего случайное положение и перемещения кабины. В свою очередь, изменение $\Delta h_i$ происходит в зависимости от случайного сочетания в данном цикле номеров этажей $M_i$, $L_i$, $S_i$;

— случайного значения массы перевозимых пассажиров $Q_i$.

Помимо статических нагрузок, действующих на канаты лифта и передающихся на его приводные элементы в периоды неподвижного состояния и установившегося движения (КВШ, редуктор, двигатель, тормозное устройство), система испытывает и динамические нагружения в периоды неустановившихся движений при пусках, торможениях и др.

Типовая схема привода и трансмиссии лифта представлена на рис. 4. В данном случае рассматривается схема редукторного привода. В настоящее время получают распространение системы безредукторных приводов с двигателем, имеющим частотное регулирование для изменения скорости. Эти системы требуют отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы.

Будем рассматривать совокупность кинематически соединенных элементов «двигатель — редуктор — КВШ — канаты — кабина — противовес» как систему с одной степенью свободы. В реальных условиях кабина и противовес, подвешенные на канатах, могут совершать, кроме общих, кинематически согласованных движений вместе со всеми элементами, дополнительные колебательные движения и вызывать соответствующие нагрузки в канатах и других соединенных с ними элементах.

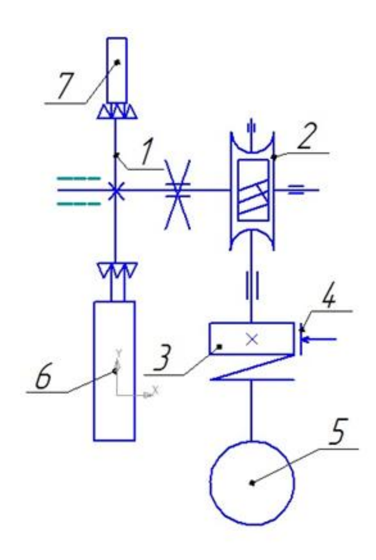



Рис. 4. Расчетная кинематическая схема лифта с редукторной трансмиссией: 1 — КВШ; 2 — редуктор червячный; 3 — соединительная муфта с тормозным шкивом; 4 — колодочный тормоз; 5 — электродвигатель; 6 — кабина; 7 — противовес

Для решения такой задачи требуется представление системы привода лифта как минимум в трехмассовой постановке. Необходимо отметить, что низкочастотные колебания кабины в процессе перемещения пассажиров существенно ухудшают уровень комфортности, поэтому предусматриваются конструктивные решения, исключающие возникновение колебательных процессов.

В дальнейшем будем рассматривать совокупность взаимосвязанных частей как приведенную одномассовую систему[10]. Центром приведения принята ось вращения электродвигателя. Как видно на схеме, представленной на рис. 4, нагрузки от сил тяжести кабины и противовеса прикладываются не напрямую на электродвигатель, а передается через ряд промежуточных элементов. Таким образом, можно записать для привода лифта известное уравнение динамики электропривода[7]:

$$\mathrm{J}_{\text{пр}} \cdot \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{dt}} = \mathrm{M}_{\text{дв}} - \sum \mathrm{M}_{\mathrm{c}}, \tag{3}$$

где $J_{\text{пр}}$ — приведенный к валу двигателя момент инерции системы «двигатель–редуктор–ведущий шкив–канаты–кабина–противовес», кг·м$^2$;

$M_{дв}(\omega)$ — крутящий момент, развиваемый двигателем в функции угловой скорости, Н·м, это соотношение определяется механической характеристикой двигателя;

$\Sigma M_c$ — сумма приведенных к валу двигателя моментов сопротивлений от перемещения кабины, противовеса, канатов и потерь в передачах, Н·м.

В общем случае

$$\Sigma M_c = \sum_1^2 S_i \cdot r_{\text{к}} / i_{\text{ред}}, \text{ где} \tag{4}$$

$S_i$ – усилие в канате в точках набегания и сбегания с КВШ, Н, определяемое по формулам (1) и (2). В этих формулах $r_k$ –радиус канатоведущего шкива, м; $i_{\text{ред}}$ – передаточное число редуктора; ω – угловая скорость двигателя, 1/с; t – текущее время, с.

Из формул (1), (2), (3) и (4) следует, что мгновенное значение суммарного момента $M_{\text{дв}i}$ зависит от приведенного к валу двигателя момента инерции системы $J_{\text{пр}i}$, усилий в ветвях каната $S_{\text{п}1}$и $S_{\text{k}1}$, которые, в свою очередь, определяются сочетанием представленных ранее случайных величин M, L, S и γ.

Вместе с тем, в соответствии с целью работы необходимо установить влияние всех составляющих нагрузок и режима их формирования в целом на периодичность ТО лифта. Для этого необходимо определить так называемую представительную эквивалентную нагрузку на лифт, например, крутящий момент $\mathrm{M}_{\text{экв}}$, которая и будет величиной, оказывающей влияние на программу ТО, прежде всего на периодичность ТО. Условная ось в системе привода лифта, относительно которой вычисляется $\mathrm{M}_{\text{экв}}$, принципиального значения не имеет, т. к. с помощью известных методов приведения эквивалентная нагрузка может быть пересчитана в произвольную точку. В настоящей работе точкой приведения выбран вал главного двигателя.

Крутящий момент на валу двигателя лифта в функции времени $M_{д.i}=f(t)$ на каждом отдельном этапе движения — при вызове или движении с пассажирами — определяется в результате решения дифференциального уравнения (3).

[10] Епифанов, А. П. Основы электропривода : учебное пособие / А. П. Епифанов. Санкт-Петербург : Лань, 2009. 192 с.

Приведенный момент инерции системы $J_{npi}$ будем рассматривать в течение данного i-го цикла как постоянную величину, равную сумме моментов инерции вращающихся и поступательно движущихся масс: ротора двигателя $J_{дв}$, редуктора, включая КВШ, кабины с грузом, противовеса и ветвей канатов. Используя известное правило приведения масс и моментов инерции, получим соотношение для расчета приведенного момента инерции системы в i-м цикле работы лифта:

$$J_{прi} = J_{дв}K_{вр} + [Q_k + Q_п + Q_{пасп} \cdot \gamma_i + q_k \cdot n_k \cdot (N-1) \cdot h_{эт}] \frac{r^2}{i_p^2},$$

где $K_{вр}$ — коэффициент, учитывающий вращающиеся массы редуктора и КВШ;

$Q_{пасп}$ — паспортная грузоподъемность лифта, кг;

Сумма моментов сопротивления $\sum M_c$, приведенных к валу двигателя,
при подъеме кабины:

$$\sum M_c = (r_к / i_{ред})\ (S_{k1} – S_{п1}) \frac{1}{\eta_{ред}} \tag{5}$$

при спуске кабины:

$$\sum M_c = (r_к / i_{ред})\ (S_{п1} – S_{к1}) \eta_{ред}. \tag{6}$$

Для расчета суммы моментов на валу двигателя значения $S_{k1}$ и $S_{п1}$ необходимо подставлять из формул (1) и (2) с учетом правила знаков. При этом для случая подъема кабины с пассажирами — по формуле (5), сумма моментов будет положительной, для спуска грузов (6) — отрицательной. При подъеме кабины в формулу (5) значения $S_{k1}$ и $S_{п1}$ нужно подставлять в виде:

$$S_{k1} = \frac{(Q_i+Q_k) \cdot g + (F_k + F_г)}{\eta_б^2} + n \cdot q_{тк} \cdot (H - \Delta h) \cdot g; \ S_{п1} = [Q_п \cdot g – F_п] \cdot \eta_б + n \cdot q_{тк} \cdot \Delta h \cdot g.$$

При спуске кабины в формулу (6) значения $S_{п1}$ и $S_{k1}$ нужно подставлять в виде:

$$S_{п1} = [Q_п \cdot g + F_п] \cdot \eta_б + n \cdot q_{тк} \cdot \Delta h \cdot g, 0.$$

$$S_{k1} = \frac{(Q_i+Q_k) \cdot g – (F_k + F_г)}{\eta_б^2} + n \cdot q_{тк} \cdot (H - \Delta h)\ g.$$

В последнем случае сумма моментов сопротивлений $\sum M_c$, рассчитанная по формуле (6), будет отрицательной, т. к. $S_{k1} > S_{п1}$. При решении дифференциального уравнения (3) необходимо учитывать, что момент, развиваемый двигателем при пуске и после окончания пуска, $M_{дв} < 0$.

При решении дифференциального уравнения (3) необходимо задать начальные и конечные условия. Начальные условия для всех режимов движения с грузом или без груза одинаковы: при t=0, φ=0, ω=0. В результате решения уравнения получаем изменение момента на валу двигателя $M_{дв}$, перемещения кабины h (м), угловой скорости ω (рад/с) от времени. Рассмотрим решение уравнения (5) в целях получения функций времени $M_{дв}$, h, $t$, ω.

Параметры двигателя и его механическая характеристика $M_{дв}(\omega)$ представлены графически на рис. 5.

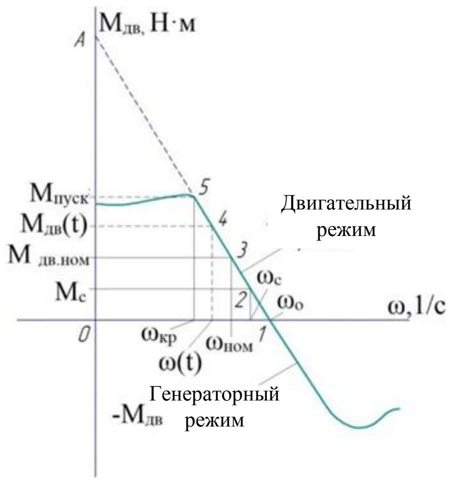



Рис. 5. Механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого двигателя:
1 — идеальный холостой ход (синхронная угловая скорость); 2 — соответствует статической нагрузке ($\sum M_c$) в двигательном режиме; 3 — номинальной нагрузке двигателя; 4 — текущему состоянию двигателя;
5 — пусковому (критическому) режиму работы

Процесс движения в каждом цикле (с пассажирами или без них, вверх или вниз) включает в общем случае четыре этапа (рис. 6):

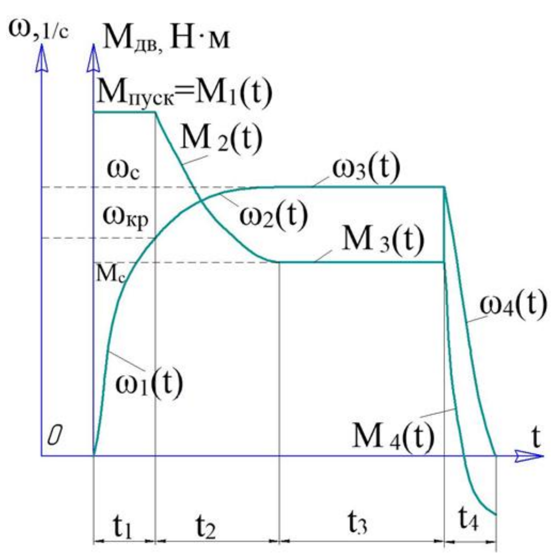



Рис. 6. Качественная картина изменения угловой скорости ω(t) и момента на валу двигателя $M_{дв}$(t) по периодам движения лифта

Необходимо отдельно рассмотреть решение уравнения при подъеме кабины $\sum M_c > 0$ (двигательный режим) и спуске кабины $\sum M_c < 0$ (генераторный режим).

*Двигательный режим.* На первом этапе момент, развиваемый двигателем, равен пусковому, $М_{пуск}$. Величина его сохраняется в течение всего первого периода $M_{дв}(\omega) = М_{пуск}$. Уравнение (3) принимает вид:

$$J_{пр1} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{пуск} - \sum M_{c1.}$$

Решая дифференциальное уравнение, после преобразований получим выражения для расчета момента двигателя, времени каждого этапа и пути, проходимого кабиной. Для первого этапа:

$$М_{дв1}(t) = М_{пуск}.$$

$$t_1 = \frac{\boldsymbol{J}_{пр\mathbf{1}}\boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{o}}^{\mathbf{2}}(\mathbf{1}-\boldsymbol{S}_{кр})^{\mathbf{2}}(\mathbf{1}-\boldsymbol{S}_{ном})}{1000N_{дв}(\lambda_{пуск}-\lambda_{с})}.$$

$$h_1 = = \frac{J_{пр.1} \cdot \omega_0^3 \cdot (1-S_{кр})^2 \cdot (1-S_{ном}) \cdot r}{2000 \cdot N \cdot (\lambda_{пуск}-\lambda_{с}) \cdot i_{ред}}.$$

На втором этапе пуск продолжается от угловой скорости $\omega_{кр}$ до угловой скорости $\omega_с$, соответствующей моменту статической нагрузки $\sum M_c$, т. е. на отрезке $\omega_с \leq \omega \leq \omega_{кр}$ (рис. 5 и 6). Движение происходит на рабочем участке характеристики двигателя. Результаты решения и преобразований на участке 2:

$$M_{дв2} = M_{дв}(\omega_{ср}) = \frac{M_{ном}}{S_{ном}}\left(1 - \frac{\omega_{ср}}{\omega_{ном}}\right).$$

$$t_2 = \frac{J_{пр} \cdot \omega_о^2}{1000N} S_{ном} ln\left[20\left(\frac{\lambda_{пуск}}{\lambda_с} - 1\right)\right];$$

$$h_2 = \frac{\omega_{ср} \cdot r_k}{2i_{ред}} t_2,$$

где $\omega_{ср} = \frac{\omega_0}{2}(2 - S_{кр} - \lambda_с S_{ном})$, $\lambda_{пуск}, \lambda_с$ — соответственно отношение пускового момента двигателя, статического момента сопротивления к номинальному.

По завершении второго этапа двигатель переходит в режим установившегося движения, скорость кабины определяется по формуле

$$v_2 = \frac{\omega_0 \cdot r_k}{i_{ред}}(1 - \lambda_с S_{ном}). \quad (7)$$

На третьем этапе происходит движение системы с установившейся скоростью, которая определяется по формуле (7). Для расчета пути третьего этапа $h_3$ необходимо: вычислить высоту подъёма (спуска кабины) при вызове или движении с пассажирами как разность уровней этажей (L–M)h или (M–S)h, где h — межэтажная высота; определить сумму расстояний, которые прошел лифт на первом и втором этапах: $h_1+h_2$; вычислить путь третьего этапа: $h_3=(L–M)h–(h_1+h_2)$.

Таким образом, получены все необходимые соотношения для силового моделирования работы лифта в двигательном режиме.

В генераторном режиме, когда при спуске кабины с грузом, $М_с<0$, продолжительностью разгона можно пренебречь. Система «двигатель — редуктор — КВШ — канаты — кабина — противовес» за короткое время

переходит в генераторный режим, двигатель создает тормозной момент, вращаясь с сверхсинхронной скоростью. Скорость спуска определяется по механической характеристике при подстановке $M_{дв}$=–$M_c$ (рис. 5):

$$v_{ген} = \frac{\omega_0 \cdot r_k}{i_{ред}} \left(\frac{M_c}{M_{ном}} S_{ном} + 1\right).$$

При расчете $M_c$<0 в формуле (6) необходимо вводить КПД редуктора в числитель. Зная $v_{ген}$, можно найти по аналогии с предыдущим высоту $h_{ген}$ и продолжительность опускания кабины на высоту $Kh_{ген}$, где K — число межэтажных пролетов, проходимых лифтом.

Имитационное моделирование силовых режимов лифта выполнено по программе[11]. На рис. 7 представлены фрагменты результатов моделирования эквивалентных нагрузок. Как видно на графиках, момент на валу главного двигателя увеличивается пропорционально квадрату этажности дома и существенно зависит от времени наблюдений.

**Обсуждения.** Вопросы обоснования регламента ТО пассажирских лифтовых установок остаются весьма актуальными. Сущность проблемы в том, что программы ТО, рекомендуемые в нормативных документах и используемые на практике, не учитывают реальных режимов нагружения основных узлов по величине и во времени. Для воспроизводства реальных режимов лифтовых установок, функционирующих под влиянием многочисленных случайных воздействий, доказана необходимость и целесообразность имитационного моделирования.

Особенность полученных результатов исследования в сравнении с известными нормативными и литературными данными в том, что выбор регламент ТО конкретного лифта связан корреляционными соотношениями с режимными характеристиками и остаточным ресурсом установки.

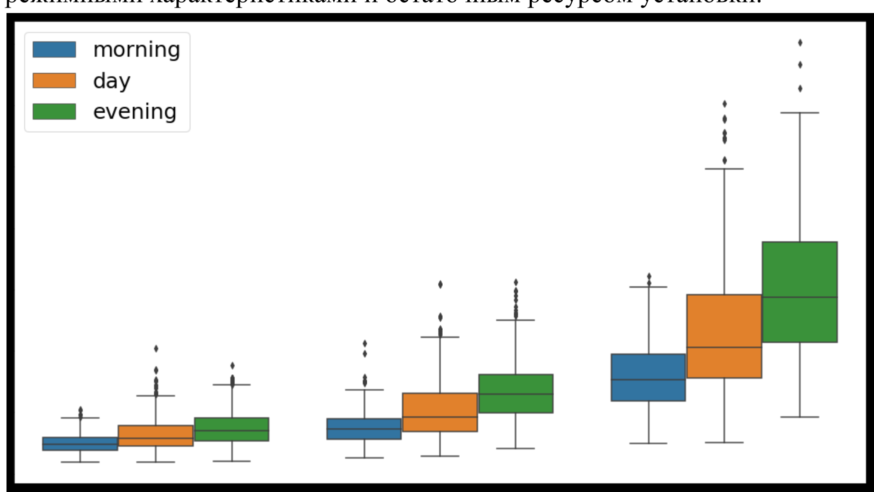



Рис. 7. Зависимости эквивалентного момента на валу двигателя лифта от этажности жилого дома (9, 16, 22 этажа) и отрезка времени наблюдений: утро (morning), день (day), вечер (evening)

**Заключение.** В результате исследований предложен комплексный показатель загруженности лифта, учитывающий чистое время работы, величину эквивалентной нагрузки, удельное число включений и степень отработки ресурса. В соответствии с величиной показателя определяется структура ТО. Разработаны математические модели рабочих процессов, в том числе функции распределения случайных воздействий, позволяющие осуществлять имитационное моделирование режимов работы лифтов с учетом случайного характера влияющих факторов. Детально описаны соотношения для расчета статических и динамических усилий привода лифта. Получены базовые соотношения влияния параметров лифта и условий эксплуатации на силовые и кинематические показатели лифтовой установки.

**Библиографический список**

1. Testing of transport system management strategy / Sergey Lupin, Than Shein, Kyaw Kyaw Lin, Anastasia Davydova // In: Proc. IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014). 10.1109/EWDTS.2014.7027050

2. Антоневич, А. М. Анализ современных конструкций лифтов и тенденций их развития / А. М. Антоневич // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2010. — № 5. — С. 18–35. — URL: http://rep.bntu.by/handle/data/1408 (дата обращения: 21.06.2021).

3. Yimin, D. Permanent Magnet Synchronization Gearless Drive / D. Yimin // Elevator World. — 2004 — P. 108–115.

[11] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664988 . Рос. Федерация. Имитационное моделирование работы пассажирского лифта / А. В. Отроков, Г. Ш. Хазанович, Д. С. Апрышкин; правообладатель ДГТУ. Заявка № 2018662780 от 14.11.2018. Опубликовано 27.11.2018. Бюл. № 12.

4. Манухин, С. Б. Устройство, техническое обслуживание и ремонт лифтов / С. Б. Манухин, И. К. Нелидов. — Москва : Академия, 2004. — 336 с.

5. Шпет, Н. А. Исследование отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации / Н. А. Шпет, О. П. Муравьев // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323, № 4. — С. 123–125.

6. Эрдем, И. С. Профилактическое техническое обслуживание лифтов / И. С. Эрдем, М. Озкирим // Лифт. — 2006. — № 4. — С. 32–36.

7. Hongjiu Liu. Research on Preventive Maintenance Strategy of Elevator Equipment / Hongjiu Liu, Jiaxuan Wu // Open Journal of Social Sciences. — 2018. — Vol. 6 (1). — P. 165–174. https://doi.org/10.4236/jss.2018.61012

8. Jae-Hak Lim. Optimal Periodic Preventive Maintenance Schedules with Improvement Factors Depending on Number of Preventive Maintenances / Jae-Hak Lim, Dong Ho Park // Asia Pacific Journal of Operational Research. — 2007. — Vol. 24 (1). — P. 111–124. https://doi.org/10.1142/S0217595907001139

9. Torgny Almgren. Optimization Models for Improving Periodic Maintenance Schedules by Utilizing Opportunities / Torgny Almgren, Niclas Andréasson, Myrna Palmgren // In: Proc. World Conference on Production and Operation Management. Amsterdam, the Netherlands, July 1–5, 2012.

10. Li, Y. H. Maintenance Interval Optimization Method Based on Improvement Factor for System Components / Y.H. Li, Z. Liu // Mechanical Engineering & Automation. — 2016. — No. 4. — P. 6−8.

11. Хазанович, Г. Ш. Оценка нагруженности силовых элементов пассажирского лифта по результатам регулярного мониторинга / Г. Ш. Хазанович, Д. С. Апрышкин // Безопасность техногенных и природных систем : [сайт]. — 2020. — № 1. — С. 32–42. — URL: https://bps-journal.ru/upload/iblock/05b/5_103-KHazanovich_32_42.pdf (дата обращения: 21.06.2021). https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-32-42

12. Карташевский, В. Г. Основы теории массового обслуживания / В. Г. Карташевский. — Москва : Радио и связь, 2006. — 107 с.

13. Апрышкин, Д. С. Методика и алгоритм имитационного моделирования режимов работы пассажирского лифта / Д. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2020. — № 3 (33). — С. 84–92.

14. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. — Москва : ДМК Пресс, 2004. — 320 с.

15. Modelling of the Transport Systems in a Competitive Environment / Sergey Lupin, Than Shein, Kyaw Kyaw Lin, Anastasia Davydova // In: Proc. Fifth Int. Conf. on Internet Technologies and Applications (ITA 13). — Glyndwr University, Wrexham, North Wales, UK, 10-13 September 2013. — P. 516, p. 41−48.

Поступила в редакцию 17.05.2021
Поступила после рецензирования 31.05.2021
Принята к публикации 04.06.2021

*Об авторах:*

**Апрышкин Дмитрий Сергеевич**, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6829-3861, aprechnik@mail.ru

**Хазанович Григорий Шнеерович**, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3009-4952, hazanovich@mail.ru

**Гутаревич Виктор Олегович**, профессор кафедры «Транспортные системы и логистика», ГОУВПО Донецкий национальный технический университет (283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58), доктор технических наук, viktor.gutarevich@mail.ru

*Заявленный вклад авторов*:

Д. С. Апрышкин — формирование цели, задач и программы исследования, вывод математических моделей, оформление графической части; Г. Ш. Хазанович — формирование концепции технического обслуживания лифтов, обоснование основных режимов работы лифтовых установок, выбор влияющих факторов, консультации при выводе математических моделей; О. В. Гутаревич — описание функционирования лифтовых установок, подбор материалов для анализа вопроса, участие в анализе режимов работы лифтовых установок.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

МАШИНОСТРОЕНИЕИМАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

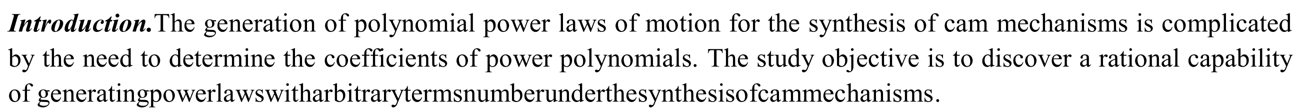





UDC 621.01/03 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-184-190

## Rational Possibility of Generating Power Laws in the Synthesis of Cam Mechanisms

**B.Paleva-Kadiyska[1], R. Roussev[2], V. Galabov[3]**
[1]South-West University “NeofitRilski” (Blagoevgrad, Bulgaria)
[2]Trakia University (Yambol, Bulgaria)
[3]Technical University, (Sofia, Bulgaria)



***Introduction.***The generation of polynomial power laws of motion for the synthesis of cam mechanisms is complicated by the need to determine the coefficients of power polynomials. The study objective is to discover a rational capability of generatingpowerlawswitharbitrarytermsnumberunderthesynthesisofcammechanisms.
***Materials and Methods.***A unified formula for determining the values of coefficients of power polynomials with any number of integers and/or non-integer exponents is derived through the so-called transfinite mathematical induction.
***Results.***A unified formula for determining the values of coefficients, which gives correct results for any number of even and/or odd exponents, is presented. The correctness of the derived formula is validated by the results on the multiple checks for different numbers, even and odd values of the exponents of quinquinomial and hexanomial power functions.
***Discussion and Conclusions.*** A unified formula for determining the values of coefficients of power polynomials makes it possible to rationally define the laws of motion without finite and infinite spikes in the synthesis of elastic cam-lever systems. This provides a rational determination of the laws of motion without finite and infinite spikes in the synthesis of elastic cam-lever systems, and simple verification of the accuracy of the results obtained. The functions are particularly suitable for the synthesis of polydyne cams, as well as cams, since one polynomial can be used throughout the entire geometric mechanism cycle.

***Keywords:***cam mechanisms, laws of motion, power functions.

***For citation:*** B. Paleva-Kadiyska, R. Roussev, V. Galabov. Rational possibility of generating power laws in the synthesis of cam mechanisms. AdvancedEngineeringResearch, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 184–190. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-184-190





## Рациональная возможность генерации степенных законов в синтезе кулачковых механизмов

**Б. Палева-Кадийска[1], Р. Русев[2], В. Галабов[3]**
[1] Юго-Западный университет «Неофит Рилски»(Благоевград, Болгария)
[2]Университет Тракии(Ямбол, Болгария)
[3]Технический университет(София, Болгария)

***Введение.***Генерация полиномиальных степенных законов движения для синтеза кулачковых механизмов усложняется необходимостью определения коэффициентов степенных полиномов. Цель исследования раскрыть рациональную возможность генерации степенных законов с произвольным числом членов при синтезе кулачковых механизмов.
***Материалы и методы.***Методом так называемой трансфинитной математической индукции получена унифицированная формула для определения значений коэффициентов степенных полиномов с любым числом целых и/или нецелых показателей.
***Результаты исследования.***В этой исследовательской работе представлена унифицированная формула для определения значений коэффициентов, которая дает правильные результаты для любого числа четных и/или

нечетных показателей. Многочисленные проверки, проведенные при разных числах четных и нечетных значений показателей степени пять и шесть степенных функций, подтвердили правильность вывода формулы.
***Обсуждение и заключения.*** Представлена унифицированная формула для определения значений коэффициентов, которая дает правильные результаты для любого числа четных и/или нечетных показателей. Это дает рациональную возможность определения законов движения без конечных и бесконечных пиков при синтезе упругих кулачковых систем и простую проверку точности полученных результатов. Эти функции особенно подходящее для синтеза полидинамичных кулачков, а также кулачков, поскольку один многочлен может использоваться на протяжении всего геометрического цикла механизма.

***Ключевые слова:*** кулачковые механизмы, законы движения, степенные функции

***Для цитирования:*** B. Paleva-Kadiyska, R. Roussev, V. Galabov. Rational possibility of generating power laws in the synthesis of cam mechanisms. Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 184–190. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-184-190

**1. Introduction**

One of the most important tasks in the design of cam mechanisms [1−4] and in theplanning of industrial robots movements [5−7], is undoubtedly the selection of the law of motion, as the law affects the basic kinematic, force and dynamic characteristics of the generated movements [8−11].

It is generally assumed that the units are rigid bodies connected without a gap clearance, whereby the mechanism generates the desired basic law of motion. In fact, real laws of motion of the mechanisms differ significantly from the basalones as the speed of the cam, the load, the deformations, and the clearances of the cam-lever systems are greater.

The cams, synthesized according to polynomial laws of motion taking into account the dynamics and deformations of the mechanical system driven by the cam, are called polydyne cams.The design of such cams is required for the construction of high-speed and insufficiently rigid mechanical systems.

The development of methods for the synthesis of polydyne cams was started in 1948 by Dudley [12], supplemented and developed by many other authors mainly in connection with dynamic studies of cam-lever systems [13−18]. The main purpose of the methods is to exclude the acceleration breaks (jerks), resp. of the inertial load of resiliently susceptible mechanical systems to achieve more precise target movements with minimum oscillations.

The design of polydyne cams is required not only for cam-lever valves of automobile engines [17−19], but also for many other high-speed and insufficiently rigid mechanical systems of various technological machines [15], [19−22].

Power-polynomial laws of motion with four or more terms have great advantages in achieving the desired boundary conditions at the beginning and at the end of the phases of movement of the output at the cam mechanisms [15], [20, 21]. Such motion laws are suitable for the synthesis of mechanisms with polydyne cams [1−3], [5]. These laws make providemodelingthe laws of motion without finite and infinite spikes with better dynamic characteristics of high-speed, elastic cam-lever systems than the power trinomial and quadrinomial laws of motion. However, the derivation of power laws of motion with four or more terms is difficult due to the need to solve systems with four and more equations, respectively.

The aim of the study is to explorea rational possibility for generating basic power laws with arbitrary number of terms when formulating design laws of motion for the synthesis of cam mechanisms.

**2. Materials and Methods**

Thebasal law of motion of polydynamic cam mechanisms is most significantly affected by the basal second transfer function and its derivatives. This function, multiplied by the dynamic constant of the cam-driven mechanical system, changes the output displacement, as the inertial load generated by the acceleration deforms the system components elastically.In other words, the second derivative (the basal second transfer function) also participates in the real displacement function.

Therefore, in order to avoid spikes in the first two real transfer functions, it is required to avoid spikesin the next two basal transfer functions — the third and the fourth.This cannot be achieved for the limits of the phases of movement of the output unit if a power trinomial or quadrinomial displacement function is selected. These spikes will be avoided if the displacement function and its first four derivatives are continuous functions.

***The displacement function*** of the output link of the cam mechanism may, in any law of motion, be written in summary form $B = B_0 + \Delta B(\varphi) = B_0 + H.u(\xi)$, where $B$ is the output coordinate formed by its initial value $B_0$, which determines the initial position of the output link, to which the *displacement function* of the output link is added — a product of the follower motion $H \equiv \Delta B_{max}$ and the normalized function $u(\xi)$. The velocity, acceleration and the subsequent derivative (jerk) of the follower's motion correspond to the transfer functions $B'(\varphi)$, $B''(\varphi)$, $B'''(\varphi)$,which

differ by only one factor $H/\Phi_1$, $H/\Phi_1^2$ and $H/\Phi_1^3$ ($\Phi_1$ is the cam angle of the follower rise) respectively from the derivatives $u'$, $u''$ and $u'''$ of the normalized function $u(\xi)\in[0;\ 1]$ in the argument $\xi=\varphi/\Phi_1\in[0;\ 1]$:

$$\begin{cases}\Delta B = H\,.\,u(\xi);\\ B' = \dfrac{H}{\Phi_1}u'(\xi);\\ B'' = \dfrac{H}{\Phi_1^2}u''(\xi);\\ B''' = \dfrac{H}{\Phi_1^3}u'''(\xi)...\end{cases} \qquad (1)$$

For a ***binomial power function*** with the exponents $k$ and $m$, the coefficients $a_k$ and $a_m$ are determined by the relations:

$$a_k=\frac{m}{(m-k)};\quad a_m=\frac{k}{(k-m)}.$$

For a ***trinomial power function*** with the exponents $k$, $m$ and $p$, the coefficients $a_k$, $a_m$ and $a_p$ are determined by the relations:

$$a_k=\frac{m\ p}{(m-k)(p-k)};\quad a_m=\frac{k\ p}{(k-m)(p-m)};\quad a_p=\frac{k\ m}{(k-p)(m-p)}$$

There are known formulas for determining the coefficients of normalized power functions up to four integers and/or non-integer power exponents.

For a ***quadrinomial power function*** with the exponents $k, m, p$ and $q$, the coefficients $a_k$, $a_m$, $a_p$and $a_q$ are determined by the relations:

$$a_k=\frac{m\ p\ q}{(m-k)(p-k)(q-k)};\ a_m=\frac{k\ p\ q}{(k-m)(p-m)(q-m)};$$

$$a_p=\frac{k\ m\ q}{(k-p)(m-p)(q-p)};\ a_q=\frac{k\ m\, p}{(k-q)(m-q)(p-q)}.$$

Aformula for determining the coefficients of normalized power functions with an arbitrary number of integer and non-integer exponents is derived.

**According to the method of the so-called *transfinite mathematical induction*, it can be assumed that the formulas for determining the values of the coefficients of the input normalized power functions are valid for any plurality of integer and non-integer exponents.** The known formulas for determining the values of the coefficients are true for two, three and four even and odd exponents, from which the ***inductive assumption***follows that for any number of even and/or odd exponents, a formula for the values of the coefficients is inductively obtained

$$a_j=\frac{k\ .\ m\ .\ p\ ...\ v}{(k-j)(m-j)(p-j)...(v-j)}\ , \qquad (2)$$

in which $j$ consistently takes $n$ in the number of values $k, m, p,..., v$. The numerator of (2) excludes the exponent $j$ (it isassumed that j = 1), and in the denominators of any value of exponents (except $j$), the value of $j$ is subtracted. In other words, the value of each unknown coefficient $a_j$ of the normalized power function is determined by the relation (2) with the numerators, which isthe product of the exponents, excluding $j$,and the denominator, which is the product of the difference between the exponents (except $j$) and the exponent $j$.

**3. Results**

To verify the results obtained, the sum of the values of the calculated coefficients must be equal to one:

$$k+m+p+...+v=1.$$

An ***inductive inference*** for (2) is reached if it is also proved that an arbitrary number $n$is odd and/or odd values of exponents. The correctness of formula (2) is validated by the results on the multiple checks for different numbers of $n$, even and odd values of the exponents of quinquinomial and hexanomial power functions. Two functions have been selected from them.

***Example 1***. Let the power function be quinquinomial with integers and non-integers exponents. For example, at $k$ = 5; $m$ = 5.5; $p$ = 6;$q$ = 6.5; $s$ = 7 from formula (2), it is obtained:

$a_k$ = 1001; $a_m$ = -3640; $a_p$ = 5005; $a_q$ = -3080; $a_s$ = 715.

The results are true since$a_k + a_m + a_p + a_q + a_s = 1$.

Thus, for the normalized power function and its derivatives, we obtain:

$$\begin{cases} u = 1001\xi^5 - 3640\xi^{5.5} + 5005\xi^6 - 3080\xi^{6.5} + 715\xi^7, \\ u' = 5005(\xi^4 - 4\xi^{4.5} + 6\xi^5 - 4\xi^{5.5} + \xi^6), \\ u'' = 10010(2\xi^3 - 9\xi^{3.5} + 15\xi^4 - 11\xi^{4.5} + 3\xi^5), \\ u''' = 15015(4\xi^2 - 21\xi^{2.5} + 40\xi^3 - 33\xi^{3.5} + 10\xi^4), \\ u'''' = 15015(8\xi - 52.5\xi^{1.5} + 120\xi^2 - 115.5\xi^{2.5} + 40\xi^3) \end{cases} \qquad (3)$$

Indeed, for the interval boundaries $\xi \in [0, 1]$, the function $u(\xi)$ has values of 0 and 1, respectively, and all derivatives functions of $u(\xi)$ are zeroing.

Figure1presents the power polynomial $u(\xi)$ with the first three derivatives.

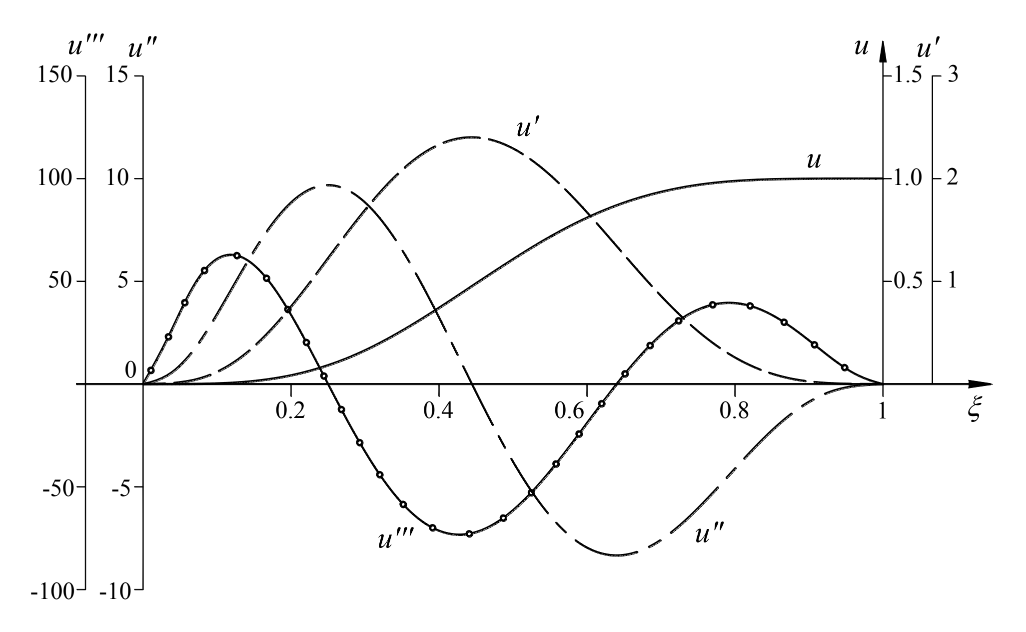



Fig. 1. Graphs of the quinquinomial u(ξ) and the first three derivatives by equation (3)

***Example 2***. Let the power function be hexanomial with integer power, for example:

$k$ = 6; $m$ = 7; $p$ = 8; $q$ = 9; $s$ = 10; $v$ = 11. From formula (2),we obtain$a_k$ = 462; $a_m$ = -1980; $a_p$ = 3465; $a_q$ = -3080; $a_s$ = 1386; $a_v$ = -252,and therefore:

$$\begin{cases} u = 462\xi^6 - 1980\xi^7 + 3465\xi^8 - 3080\xi^9 + 1386\xi^{10} - 252\xi^{11}, \\ u' = 2772(\xi^5 - 5\xi^6 + 10\xi^7 - 10\xi^8 + 5\xi^9 - \xi^{10}), \\ u'' = 13860(\xi^4 - 6\xi^5 + 14\xi^6 - 16\xi^7 + 9\xi^8 - 2\xi^9), \\ u''' = 27720(2\xi^3 - 15\xi^4 + 42\xi^5 - 56\xi^6 + 36\xi^7 - 9\xi^8), \\ u'''' = 166320(\xi^2 - 10\xi^3 + 35\xi^4 - 56\xi^5 + 42\xi^6 - 12\xi^7), \\ u''''' = 332640(\xi - 15\xi^2 + 70\xi^3 - 140\xi^4 + 126\xi^5 - 42\xi^6). \end{cases} \qquad (4)$$

Expectedly, for the boundaries of the interval $\xi \in [0, 1]$, the function $u(\xi)$ has values of 0 and 1, respectively, and all derivatives functions of $u(\xi)$ by the fifth line are zeroing. This means that the polynomial has one common point and 5 infinitely close common points with the axis $\xi$ at $\xi = 0$ and $\xi = 1$ in the positive direction to the axis $\xi$ and another 5 infinitely close common points with the axis $\xi$ at $\xi = 0$ and $\xi = 1$ in the opposite direction to the axis $\xi$. In practice, this means 11 infinitely close common points of the polynomial with the $\xi$ axis or an oscillation (tangent) of 10 lines of the polynomial with the $\xi$ axis. Although infinitely close, the common points generally lead to an approximate, but sufficiently accurate, in some cases dwell of the output link. Figure 2 presents the power polynomial $u(\xi)$ with the first three derivatives.

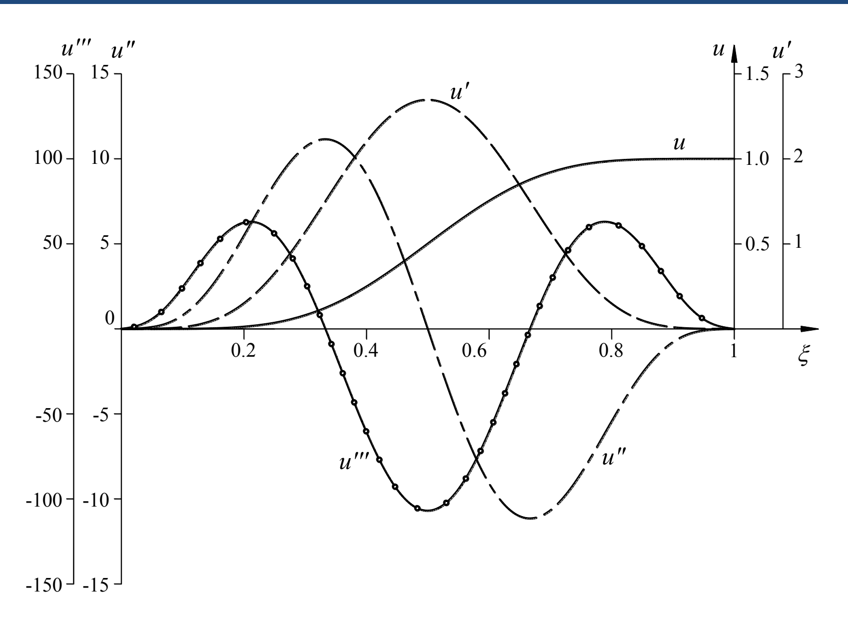



Fig. 2. Graphs of the hexanomial polynomial u(ξ) and the first three derivatives by equation (4)

For values of the exponents $k = 7$; $m = 8$; $p = 9$; $q = 10$; $s = 11$; $v = 12$ from formulas (2), it is obtained: $a_k = 792$; $a_m = -3465$; $a_p = 6160$; $a_q = -5544$; $a_s = 2520$; $a_v = -462$.

Then the normalized function and its derivatives are specified in the form:

$$\begin{cases} u = 792\xi^7 - 3465\xi^8 + 6160\xi^9 - 5544\xi^{10} + 2520\xi^{11} - 462\xi^{12}, \\ u' = 5544(\xi^6 - 5\xi^7 + 10\xi^8 - 10\xi^9 + 5\xi^{10} - \xi^{11}), \\ u'' = 5544(6\xi^5 - 35\xi^6 + 80\xi^7 - 90\xi^8 + 50\xi^9 - 11\xi^{10}), \\ u''' = 55440(3\xi^4 - 21\xi^5 + 56\xi^6 - 72\xi^7 + 45\xi^8 - 11\xi^9), \\ u'''' = 166320(4\xi^3 - 35\xi^4 + 112\xi^5 - 168\xi^6 + 120\xi^7 - 33\xi^8), \\ u''''' = 665280(3\xi^2 - 35\xi^3 + 140\xi^4 - 252\xi^5 + 210\xi^6 - 66\xi^7), \\ u'''''' = 665280(6\xi - 105\xi^2 + 560\xi^3 - 1260\xi^4 + 1260\xi^5 - 462\xi^6). \end{cases} \quad (5)$$

The check $a_k + a_m + a_p + a_q + a_s + a_v = 1$, the normalized function $u(\xi)$, and its derivatives show the accuracy of the results obtained, because of the interval's boundaries $\xi \in [0; 1]$, the function $u(\xi)$ has values of 0 and 1, respectively, and all derivative functions are zeroing.

The graphs of $u(\xi)$, $u'(\xi)$, $u''(\xi)$, and $u'''(\xi)$ are presented in Figure 3, which shows that at the beginning and at the end of the cam angle $\Phi_1$ in the rise phase distance phase (rise phase, outstroke phase), the follower remains practically stationary - an approximate dwell of the follower is realized. In the cam angle $\Phi_3$ in the return phase (reverse move, return stroke) of the follower, the normalized power functions $u(\underline{\xi})$, $u'(\underline{\xi})$, $u''(\underline{\xi})$ and $u'''(\underline{\xi})$ are retained by type with a new argument $\underline{\xi} = 1 - \xi$, where $\xi \in [0, 1]$.

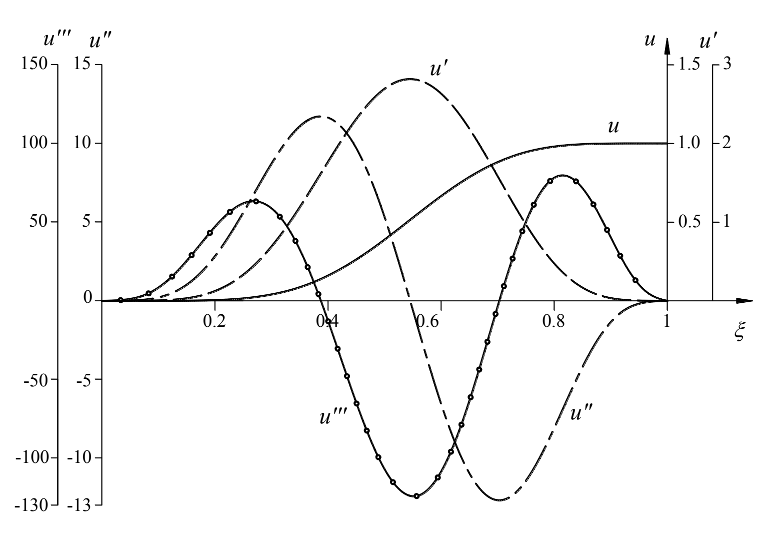



Fig. 3. Graphs of the hexanomial u(ξ) and the first three derivatives by equation (5)

*A detailed solution to the question of the laws of motion and synthesis of cam mechanisms was made by Galabov, Roussev, and Paleva-Kadiyska in [4].*

**4. Discussion and Conclusions**

The spikesin the first two transfer functions in high-speed, resilient (elastic) cam-lever systems are avoided if the displacement function and its first four derivatives are continuous functions.This cannot be achieved for the limits of the phases of movement of the output unit if a power trinomial or quadrinomial displacement function is selected. However, the derivation of power laws of motion with four or more terms is complicated by the need to solve systems with four or more equations, respectively. Therefore, by the method of the so-called transfinite mathematical induction, a unified formula for determining the values of coefficients of power polynomials with any number of integers and/or non-integer exponents is derived. It gives a rational possibility for defining the laws of motion without finite and infinite spikes in the synthesis of elastic cam-lever systems and easy verification of the accuracy of the results obtained.

The functions (3), (4), (5) and other polynomial power polynomials are especially suitable for the synthesis of polydyne cams, as well as cams, since one polynomial can be used throughout the geometric mechanism cycle.

**References**

1. Levitsky NI. Kulachkovye mekhanizmy [Cam mechanisms]. Moscow; Mashinostroenie; 1964. 287p.

2.Rothbart HA. Cams. Design, Dynamics and Accuracy. NewYork: John Wiley & Sons Inc.; 1965. 336 p.

3.Chen FY. Mechanics and Design of Cam Mechanisms. Pergamon Press, 1982. 523 p.

4.Galabov V, Roussev R, Paleva-Kadiyska BL. Synthesis of cam mechanisms I. Sofia: New Man Publishing House; 2020. 253 p. (In Bulgarian).

5.Skenderov I, Shivarov N, Galabov V. Synthesis of Pover-Polynomial Motion Laws. Problems of technical cybernetics and robotics. Sofia:Academies of Sciences of Bulgaria.2008;59:74-81.

6.Galabov V, Rousev R, Shivarov N. Planning of Movement Laws Using Trigonometric Polynomials. BAS, Theor. & Appl. Mechanics. 2010;3:3−12.

7.Galabov V, Savchev S, Slavov G. Planning of Motion Laws Using Power-Trigonometric Polynomials. Conferences & Symposia IFAC-PapersOnLine. 2015;48-24:134–137.

8.Erdman AG, Sandor GN. Mechanism Design: Analysis and Synthesis. New Jersey: Prentice-Hall Inc.;1984. Vol. 1. 2nd ed., 1991.

9.Norton RL. Design of Machinery. New York: McGraw-Hill Inc.; 1992. 306 p.

10.Erdman AG(ed). Modern Kinematics. New York: John-Wiley & Sons, Inc.; 1993. 604 p.

11.Uicker JJ, Pennock GR, Shigley JE. Theory of Machines and Mechanisms. 3rd ed. Oxford University Press, 2003. 768 p.

12.Dudley WM. New Methods in Valve Cam Design. SAE Transactions. 1948;2(1):19−33.

13.Thoren TR, Engemann HH, Stoddart DA. Cam Design as Related to Valve Train Dynamics. SAETransactions, 1952, vol. 6. https://doi.org/10.4271/520208/

14.Stoddart DA. Polydyne Cam Design. Machine Design.1953;25:121−149.

15.Berzak N, Freudenstein F. Optimization Criteria in Polydyne Cam Design. In: Proc. Fifth World Congress on TMM, Canada, Toronto, 1979. P. 1303-1306.

16.Cardona A, Lens E, Nigro N. Optimal Design of Cams. Multibody System Dynamics. 2002;7:285–305/ https://doi.org/10.1023/A:1015278213069/

17.Moreno D, Mucchi E, Dalpiaz G, et al. Multibody analysis of the desmodromic valve train of the Ducati MotoGP engines. In: Proc. Multibody Dynamics 2007, ECCOMAS Thematic Conference, Italy, Milano, 2007.

18.Tounsi M, Chaari F, Walha L, et al. Dynamic behavior of a valve train system in presence of camshaft errors. WSEAS Transactions on Theoretical Mechanics. 2011;6(1):17-26.

19.Korchemny LV. Dinamika gazoraspredelitel'nogo mekhanizma i profilirovanie kulachkov bystrokhodnykh dvigatelei [Dynamics of the gas distribution mechanism and the profiling of the cams of high-speed engines]. Moscow: Trudy NAMI. 1960;91;100.(In Russ.)

20.Sadek KSH, Daadbin A. Improved Cam Profiles for High-Speed Machinery Using Polynomial Curve Fitting. J. of Process Mechanical Engineering. Part E.1990; 204(2):127−132.

21.Blechsmidt JL, Lee CH. Design and Analysis of Cam Profiles Using Algebraic Functions.New York:ASME, DE.1991;32(2):451−459.

22. NortonRL. Design of Machinery. New York, McGraw-Hill Inc.;1992. 306 p.

Submitted 01.04.2021
Reviewed 25.04.2021
Accepted for publication 13.05.2021

*About the Authors:*

**Paleva-Kadiyska, Blagoyka I.**, chief assistant, mechanical engineer, Faculty of Engineering, South-West University "Neofit Rilski" (66, Ivan Mihaylov St., Blagoevgrad, Bulgaria, 2700), Cand. Sci. (Eng.), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8514-4542, paleva-kadiyska.bl@abv.bg

**Roussev, Rumen A.**, associate professor, mechanical engineer, Faculty of Technics and Engineering, Trakia University (38, Graf Ignatiev St., Yambol, Bulgaria, 8600), Cand. Sci. (Eng.), roussev_r@abv.bg

**Galabov, Vitan B.**, professor, mechanical engineer, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University (8, Kliment Ohridski Blvd St., Sofia, Bulgaria, 1000 ), Dr. Sci. (Eng.), vgalabov@abv.bg

*Claimed contributorship:*

B. I. Paleva-Kadiyska: preparation of the text; preparation of theresults and graphs;formulation of conclusions; translation of the paper into English; translation of the abstract and keywords into Russian.R. A. Roussev:review of literature sources;calculations; computational analysis; analysis of the research results.V. B. Galabov: basic concept formulation; formulation of the research purpose and tasks;academic advising; text processing; correction of the conclusions;approval of the final version of the paper before submitting it for publication.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

Поступила в редакцию 01.04.2021
Поступила после рецензирования 25.04.2021
Принята к публикации 13.05.2021

*Об авторах:*

**Палева-Кадийска**, **Благойка Илиева,** главный ассистент, инженер, Технический факультет, Юго-Западный университет «Неофит Рилски» (2700, Болгария, г. Благоевград, ул. Ивана Михайлова, 66), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8514-4542, paleva-kadiyska.bl@abv.bg

**Русев, Румен Анчев**, инженер, Технический и технологический факультет, Университет Тракии (8600, Болгария, г.Ямбол, ул. Графа Игнатьева, 38), кандидат технических наук, доцент, roussev_r@abv.bg

**Галабов, Витан Борисов**, профессор, инженер, Факультет машиностроения, Технический университет (1000, Болгария,г. София,ул. Св.Климент Охридски, 8), доктор технических наук, vgalabov@abv.bg

*Заявленный вклад соавторов:*

Б. И. Палева-Кадийская — подготовка текста, подготовка результатов исследования и графиков, формулировка выводов, перевод статьи на английский язык, перевод аннотации и ключевых слов на русский язык; Р. А. Русев — обзор литературных источников, расчеты, вычислительный анализ, анализ результатов исследования; В. Б. Галабов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, обработка текста, корректировка выводов,утверждение окончательной версии статьи перед подачей на публикацию.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
# INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT






УДК 620.179 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-191-199

## Алгоритм управления упруго-вязко-пластичной моделью для исследования процессов ударного взаимодействия тел

**В. Л. Лапшин**[1], **Е. В. Зеньков**[1,2]
[1] ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск, Российская Федерация)
[2] ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (г. Иркутск, Российская Федерация)

***Введение.*** В инженерной практике важное значение имеют динамические процессы, с помощью которых описывают и изучают механику взаимодействия деталей машин и элементов конструкций. Эти динамические процессы являются причиной возникновения больших деформаций, приводящих к разрушению. Целью исследования являлось создание алгоритма моделирования ударного процесса за счет управляемого преобразования механореологической модели ударного процесса из упруго-вязкой в упруго-вязко-пластичную.

***Материалы и методы.*** Предложены дифференциальные уравнения движения модели. Рассмотрены условия преобразования модели при переходе от упругих к пластическим деформациям, от этапа нагружения модели к этапу разгрузки при ударном взаимодействии с поверхностью. При расчете деформаций используется допущение о том, что упругие и пластические деформации возникают одновременно с самого начала удара. Подробно рассмотрена методика функционирования модели, составлен алгоритм работы модели, подробно описана логика его функционирования.

***Результаты исследования.*** Для исследования ударных процессов была разработана механореологическая упруго-вязко-пластичная модель. Важным параметром модели является усилие, соответствующее началу образования пластических деформаций. В результате исследований был создан более совершенный алгоритм и разработана новая компьютерная программа для исследования ударного процесса с помощью упруго-вязко-пластичной модели с регулируемым упруго-пластическим преобразованием.

***Обсуждение и заключения.*** Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности и достоверности моделирования ударных процессов с целью дальнейшего развития методик и способов определения физико-механических характеристик материалов ударными методами. Знание механических характеристик материалов необходимо при решении различных исследовательских задач путем математического моделирования вибрационных и ударных процессов. При этом важной задачей является адаптация расчетной модели к реальному ударному процессу, для чего необходима разработка соответствующих способов и методик.

***Ключевые слова:*** упруго-вязко-пластичная модель, ударное взаимодействие тел, математическое моделирование ударного процесса.

***Для цитирования:*** Лапшин, В. Л. Алгоритм управления упруго-вязко-пластичной моделью для исследования процессов ударного взаимодействия тел / В. Л. Лапшин, Е. В. Зеньков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 191–199. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-191-199





## Control algorithm for an elastic-viscoplastic model to study processes of shock interaction of bodies

**V. L. Lapshin**[1], **E. V. Zenkov**[1,2]
[1] Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)
[2] Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

***Introduction.*** In engineering practice, dynamic processes, with the help of which mechanics of interaction of machine components and structural elements are described and studied, are of great importance. These dynamic processes are the

cause of large deformations leading to the destruction. The research objective is to develop a more accurate shock simulation algorithm through the controlled transformation of the mechanorheological shock process model from elastic-viscous to elastic-viscoplastic.

***Materials and Methods.*** Differential equations of the model movement are proposed. The conditions for the transformation of the model during the transition from elastic to plastic deformations, from the stage of loading the model to the stage of unloading under the shock interaction with the surface, are considered. When calculating deformations, the assumption is made that elastic and plastic deformations occur simultaneously from the very onset of the impact. The model functioning method is considered in detail, the algorithm of the model operation is developed, the logic of its functioning is described in detail.

***Results.*** To study shock processes, a mechanoreological elastic-viscoplastic model was developed. An important parameter of the model is the force corresponding to the onset of plastic deformation. As a result of the research, a more perfect algorithm was created, and a new computer program was developed to study the shock process using an elastic-viscoplastic model with an adjustable elastic-plastic transformation.

***Discussion and Conclusions.*** The results obtained can be used to improve the accuracy and reliability of simulation of shock processes in order to further develop the techniques for determining the physical and mechanical characteristics of materials by shock methods. Knowledge of the mechanical characteristics of materials is required when solving various research problems through mathematical modeling of vibration and shock processes. At the same time, an important task is to adapt the design model to the real shock process, for which it is required to develop appropriate methods and techniques.

***Keywords:*** elastic-viscoplastic model, shock interaction of bodies, mathematical modeling of shock process.

***For citation:*** V. L. Lapshin, E. V. Zenkov. Control algorithm for an elastic-viscoplastic model to study processes of shock interaction of bodies. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 191–199. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-191-199

**Введение.** В инженерной практике важное значение имеют динамические процессы (ударные, вибрационные). С их помощью описывают и изучают механику взаимодействия деталей машин и элементов конструкций. При этом большое внимание уделяют ударным процессам, так как при этом тела подвергаются действию больших динамических нагрузок. Они могут являться причиной больших деформаций и приводить к разрушению оборудования. Данные обстоятельства объясняют повышенное внимание к моделированию и исследованию динамических процессов со стороны ученых и инженеров [1–14]. Особый практический интерес имеет развитие экспресс-методик и способов определения физико-механических характеристик материалов ударными методами. При этом важной задачей является адаптация расчетной модели к реальному ударному процессу. В связи с этим целью исследования является создание более точного алгоритма моделирования ударного процесса за счет управляемого преобразования механореологической модели ударного процесса из упруго-вязкой в упруго-вязко-пластичную. Разработанный алгоритм позволяет на этапе нагружения осуществлять преобразование модели на основе заданных условий, что обеспечивает более качественное и достоверное моделирование ударного процесса с учетом реальной пластичности материала. Предыдущая разработка не позволяла осуществить данное преобразование и модель при ударном взаимодействии являлась упруго-вязко-пластичной с самого начала нагружения.

**Материалы и методы.** Одним из направлений научных исследований в Иркутском национальном исследовательском техническом университете является моделирование и изучение процессов динамического взаимодействия твердых тел. Для изучения динамики протекания данных процессов с целью решения практических задач разработана и исследована упруго-вязко-пластичная модель [15]. Модель построена с использованием реологических и инерционных элементов $m_1$ и $m_2$, объединенных в два блока (рис. 1). Один из блоков является упруго-вязким $K_1$–$C$. Он предназначен для моделирования упругих деформаций тела. Они возникают под действием внешней нагрузки и исчезают при ее отсутствии. Упруго-пластический блок $K_2$–$f_2$ моделирует пластические деформации, остающиеся после снятия нагрузки. Масса тела учитывается инерционным элементом $m_1$. Масса $m_2$ введена для того, чтобы описывать динамику движения упруго-вязко-пластичной модели с помощью двух дифференциальных уравнений второго порядка. Чтобы исключить влияние $m_2$ на динамику процесса, ее величина принималась малой ($m_2 \leq 0{,}001\ m_1$). Как показали расчеты, при таком условии можно принять $N_1 \approx N_2$ (4).

Рассмотрим ударный процесс на примере сферического тела. При нагружении тела в нем возникают внутренние силы, препятствующие изменению формы и размера тела, то есть препятствующие (2) его деформации. Одной из них является сила сопротивления упругой деформации. При этом могут возникать

дополнительные сопротивления деформации, которые называются вязкими. Они связаны со скоростью деформации тела. На модели данные сопротивления деформации тела описываются выражениями:

$$N_1 = F_V + F_{E1},$$
$$F_V = C(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^{s1}(y_1 - y_2)^{s2}, \quad (1)$$
$$F_{E1} = K_1(y_1 - y_2)^{n1}.$$

где $y_1, y_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2$ — динамические характеристики модели, описывающие перемещение и скорость инерционных элементов $m_1$ и $m_2$; $K_1$ — параметр модели, характеризующий упругие свойства материала (упруго-вязкого блока модели); $C$ — параметр модели, характеризующий вязкие (диссипативные) свойства материала в том же блоке модели (3).

Силы сопротивления деформации, возникающие в упруго-пластическом блоке модели, описываются следующими выражениями:

$$N_2 = F_P + F_{E2}; N_2 \approx N_1;$$
$$F_{E2} = K_2\, y_2^{\,n2}; \quad (2)$$
$$F_P = f_2\, y_2^{\,n3} + F_{ST}.$$

Здесь $F_{ST}$ — усилие нагружения модели, при котором начинает работать упруго-пластический блок модели, учитывающий пластические деформации материала; $K_2$ — параметр модели, характеризующий упругие свойства материала при пластической деформации (упруго-пластического блока модели); $f_2$ — параметр модели, характеризующий пластичность материала в том же блоке модели (3).

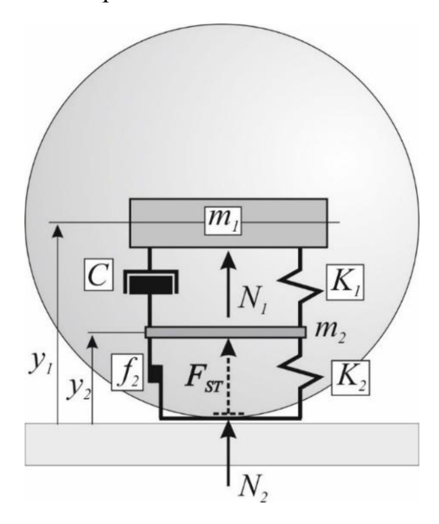



Рис. 1. Упруго-вязко-пластичная механореологическая модель

Переменные $y_1, \dot{y}_1$ описывают величину и скорость полной (суммарной) деформации. Переменные $y_2, \dot{y}_2$ описывают величину и скорость пластической деформации. Следовательно, скорость и величина упругой деформации определяется как $\dot{y}_1 - \dot{y}_2$; $y_1 - y_2$.

Реологические элементы модели (упругий, вязкий, пластичный) имеют нелинейные характеристики, то есть упругие, вязкие и пластические сопротивления деформации пропорциональны скорости и величине деформации в заданной степени ($s_1$, $s_2$, $n_1$, $n_2$, $n_3$). В качестве рекомендации можно отметить, что для упругих сопротивлений при ударе сферического тела следует использовать $n_1$=$n_2$=3/2 [2–4], для вязких и пластических сопротивлений можно принять значение равное единице [2, 3].

**Результаты исследования.** Рассмотрим работу модели. На начальном этапе использования модели в научных исследованиях использовался упрощенный вариант ее функционирования. Принималось условие, что при деформации тела упругие и пластические деформации возникают одновременно с самого начала нагружения. Это позволило разработать и опробовать на практике более простой алгоритм функционирования

модели. На его основе была разработана исследовательская компьютерная программа[1], выполнен комплекс научных исследований ударного процесса на модели[2], в том числе представленных в работе [16].

Однако данное упрощение ограничивает возможности модели и не позволяет в полном объеме выполнять исследования ударных процессов. Поэтому в результате дальнейших исследований был создан более совершенный алгоритм и разработана новая компьютерная программа для исследования ударного процесса с помощью упруго-вязко-пластичной модели с регулируемым упруго-пластическим преобразованием[3]. Рассмотрим этот алгоритм функционирования модели более подробно.

Разработанный алгоритм обеспечивает следующую последовательность функционирования блоков модели. На начальном этапе ударного процесса в работе участвует только упруго-вязкий блок модели $K_1$–$C$. Он позволяет рассчитать упругие деформации тела на этапе нагружения (рис. 2). При этом упруго-пластический блок модели не функционирует, так как до определенного момента пластические деформации в теле могут отсутствовать. Появление пластических деформаций соответствует заданному усилию $F_{ST}$. Когда расчетное усилие нагружения $N_1$ достигнет заданного значения ($N_1$=$F_{ST}$), упруго-вязкая модель преобразуется в упруго-вязко-пластичную. Начинает функционировать упруго-пластический блок модели. Когда усилие нагружения достигает своего максимального значения $N_{max}$, рост деформации прекращается и этап нагружения заканчивается. За счет упругости материала тело начинает восстанавливать свою первоначальную форму и размеры, наступает этап разгрузки модели. В ходе этого процесса исчезают упругие деформации, при этом возникшие пластические деформации остаются в теле и, соответственно, на модели. Таким образом на этапе разгрузки модели работает только упруго-вязкий блок.

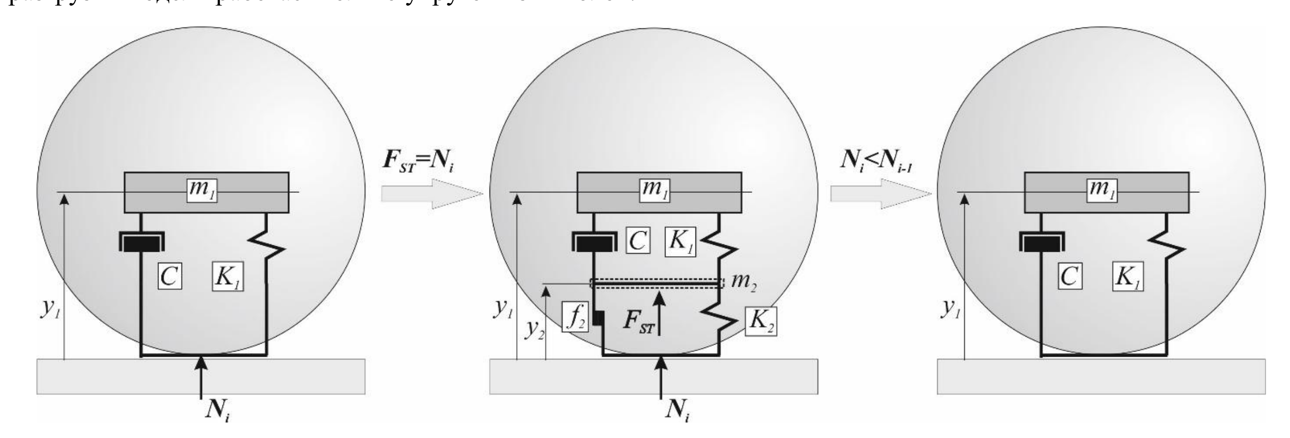



Рис. 2. Схема преобразования модели

Этап контактного взаимодействия заканчивается, когда сила нормальной реакции $N$, определяемая уравнениями (1) и (2), становится равной нулю. Тело отскакивает от поверхности на высоту $h$.

Процесс нагружения модели на различных этапах деформирования описывается с помощью дифференциальных уравнений, которые приводятся ниже:

$$m_1\ddot{y}_1 + C_1\dot{y}_1^{\,s1}\, y_1^{\,s2} + K_1 y_1^{n1} = -m_1 g\,, \tag{3}$$

$$m_1\ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^{s1}(y_1 - y_2)^{s2} + K_1(y_1 - y_2)^{n1} = -m_1 g\,, \tag{4}$$

$$m_2\ddot{y}_2 + K_2 y_2^{n2} + f_2 y_2^{n3} + C_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^{s1}(y_2 - y_1)^{s2} + K_1(y_2 - y_1)^{n1} = -m_2 g + F_{ST}\,. \tag{5}$$

С помощью уравнения (3) рассчитываются упругие деформации модели на этапах нагружения и разгрузки. С помощью уравнений (4) и (5) рассчитываются упругие и пластические деформации модели при ее нагружении на этапе пластического деформирования материала.

Сила нормальной реакции на этапе упругой деформации определяется по формуле:

$$N_i = C\dot{y}_1^{\,s1}\, y_1^{\,s2} + K_1 y_1^{n1}\,. \tag{6}$$

Сила нормальной реакции на этапе пластической деформации определяется по формуле:

[1] Удар упруго-вязко-пластичной модели сферического тела: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ. В. Л. Лапшин, А. В. Глухов. № 2011619238; дата регистрации 31.09.2011.

[2] Способ определения модуля упругости материала: патент 2526233 Рос. Федерация : МПК G 01 N 3/48 / В. Л. Лапшин, А. В. Глухов, А. В. Рудых № 2013109028/28; заявл. 28.02.2013; опубл. 20.08.14. Бюл. №23. 4 с.

[3] Удар упруго-вязко-пластичной модели с регулируемым упруго-пластическим преобразованием: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ. В. Л. Лапшин, Е. В. Зеньков. №2019618137; дата регистрации 26.06.2019 г.

$$N_i = K_2 y_2^{n2} + f_2 \dot{y}_2^{n3} + F_{ST}\,. \tag{7}$$

Вычисление производится с заданным временным шагом $dt$. Время удара определяется по формуле:

$$T = dt \cdot i, \tag{8}$$

где $i$ — количество шагов.

Условие перехода от упругой деформации к пластической имеет вид:

$$N_i > F_{ST} \tag{9}$$

Условие окончания этапа нагружения и начала этапа разгрузки модели:

$$N_{i-1} > N_i \tag{10}$$

Условие окончания этапа контактного взаимодействия модели:

$$N_i = 0 \tag{11}$$

Рассмотрим алгоритм исследования ударного процесса (рис. 3).

1. Блок 1 формирует исходные данные исследуемого процесса.

2. Блок 2 вводит исходные данные процесса: начальное время удара $t = 0$, начальную деформацию тела (модели) $y = 0$, начальную скорость деформации $\dot{y} = \dot{y}_s$, начальную силу удара $N = 0$.

3. Блок 3 выполняет вычисление значений коэффициентов модели $K_1$, $K_2$, $f_2$, $C$.

4. Блок 4 выполняет вычисление времени удара и фиксирует количество шагов расчета на этапе нагружения при упругой деформации.

5. Блок 5 выполняет вычисление параметров процесса ударного взаимодействия тел с помощью упруго-вязкого блока модели. Рассчитывается упругая деформация $y_1$ и скорость деформации $\dot{y}_1$ (уравнение (3)). Определяется сила ударного взаимодействия $N_i$ (уравнение (6)).

6. Блоки 6 и 16 осуществляют проверку по условию (11). При невыполнении условия расчет продолжается на следующем шаге этапа ударного взаимодействия. Если условие выполняется, то расчет завершается и выполняется переход к этапу отскока модели.

7. Блоки 7 и 12 контролируют момент завершения процесса нагружения модели. Выполнение условия (10) означает, что этап нагружения модели закончился, сила контактного взаимодействия $N_i$ начинает уменьшаться. Выполняется расчет на этапе разгрузки модели. Вычисление передается блоку 4 или 14. При невыполнении условия (10) сила контактного взаимодействия $N_i$ продолжает увеличиваться. Этап нагружения модели продолжается и вычисление производят блоки 8 или 13.

8. Блок 8 фиксирует наибольшую величину силы контактного взаимодействия $N_{max}$, соответствующее ей время в процессе удара $T_{Nmax}$ и передает управление блоку 9.

9. Блок 9 определяет окончание этапа упругой деформации при нагружении модели. Если условие (9) выполняется, значит сила нормальной реакции модели $N_i$ превышает заданное усилие $F_{st}$, соответствующее началу образования пластических деформаций. Этап упругой деформации завершается, начинается этап упруго-пластической деформации и управление передается блоку 10. Если условие (9) не выполняется, значит сила нормальной реакции модели $N_i$ меньше заданного значения $F_{st}$ и пластические деформации отсутствуют. Вычисление передается блоку 4 для выполнения расчета на следующем шаге этапа упругой деформации.

10. Блок 10 производит расчет текущего времени и номера шага вычисления на этапе упруго-пластической деформации.

11. Блок 11 выполняет вычисление параметров процесса ударного взаимодействия тел на этапе пластического деформирования. Рассчитываются скорости и величины деформаций модели $y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2$ (уравнения (4) и (5)), определяется сила контактного взаимодействия $N_i$ (уравнение (7)). Далее управление передается блоку 12.

12. Блок 12 определяет окончание этапа нагружения модели. Если условие (10) выполняется, значит сила нормальной реакции $N_i$ уменьшается, этап нагружения модели закончился и выполняется переход к этапу разгрузки модели. Управление передается блоку 14. Если условие (10) не выполняется, значит сила нормальной реакции $N_i$ продолжает увеличиваться, идет этап нагружения модели и управление передается блоку 13.

13. Блок 13 фиксирует наибольшую величину силы контактного взаимодействия $N_{max}$ и соответствующее ей время в процессе удара $T_{Nmax}$ и передает управление блоку 10 для расчета на следующем шаге этапа упруго-пластической деформации.

14. Блок 14 производит расчет текущего времени и номера шага вычисления на этапе упругой деформации при разгрузке модели. Управление передается блоку 15.

15. Блок 15 выполняет расчет параметров процесса ударного взаимодействия тел с использованием упруго-вязкой модели при разгрузке: упругой деформации $y_1$, скорости деформации $\dot{y}_1$ по уравнению (3), силы нормальной реакции $N_i$ по уравнению (6). Управление передается блоку 16.

16. Блок 16 осуществляет проверку условия (11). При невыполнении условия этап ударного взаимодействия продолжается и управление передается блоку 14. При выполнении условия расчет на этапе ударного взаимодействия завершается и осуществляется переход к этапу отскока модели. Управление передается блоку 17.

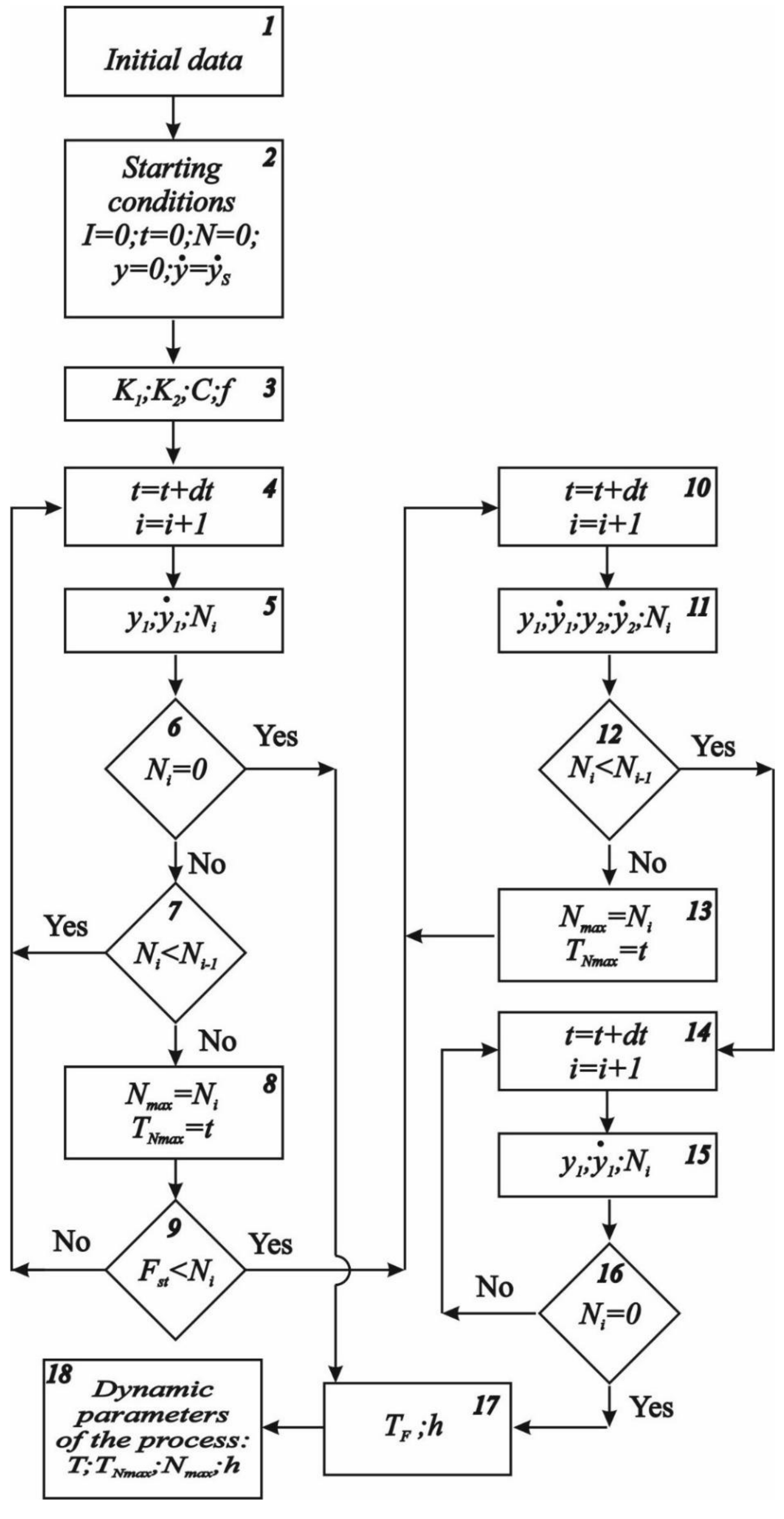



Рис. 3. Схема алгоритма

17. Блок 17 определяет высоту отскока тела *h*, время полета при отскоке $T_F$ и передает управление блоку 18.

18. Блок 18 формирует и выводит основные характеристики ударного процесса: время ударного взаимодействия тел (модели) *T* (уравнение (8)); силу ударного взаимодействия тел $N_{max}$; время в процессе удара $T_{Nmax}$, соответствующее $N_{max}$; высоту отскока тела (модели) *h*.

На базе разработанного алгоритма была создана исследовательская компьютерная программа[4]. С использованием авторской программы были выполнены исследования процесса ударного взаимодействия тел [17]. Изучалось влияние различных факторов на динамику ударного процесса. В частности, на модели изучалось влияние механических свойств материала (упругости, вязкости, пластичности) на время и силу ударного взаимодействия сферического тела с поверхностью, величину и скорость деформации, высоту отскока после удара. При этом рассматривались различные варианты упруго-пластического преобразования исследовательской модели, отражающие переход из упругого в упруго-пластическое состояния материала при нагружении.

Сравним работу упруго-вязко-пластичной модели по предыдущему (график 1, рис. 4) и новому (график 2, рис. 4) алгоритму.

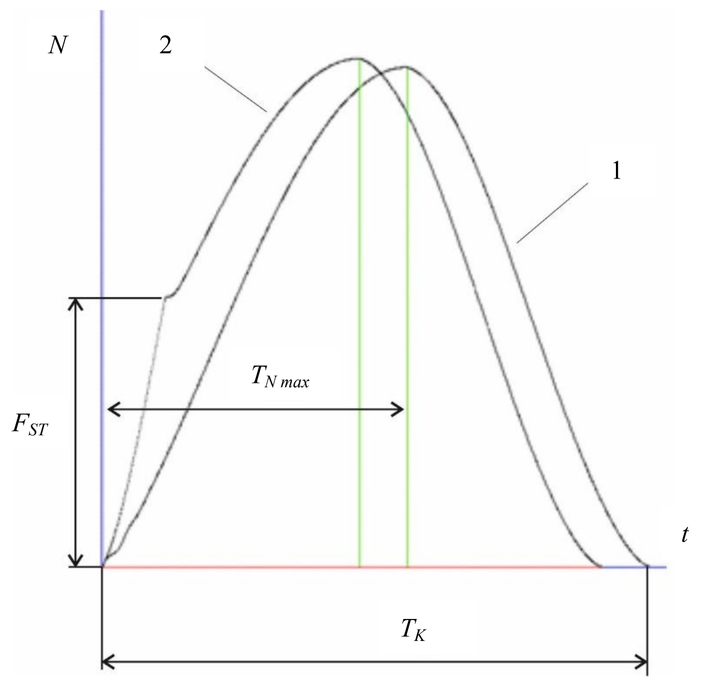



Рис. 4. Изменение силы ударного взаимодействия тел *N*

Новый алгоритм позволяет при моделировании ударного процесса взаимодействия тел осуществлять переход от упруго-вязкой модели к упруго-вязко-пластичной модели по заданному усилию ударного взаимодействия $F_{ST}$. Этот переход на модели соответствует началу образования вматериале пластических деформаций, что позволяет описывать ударный процесс более достоверно и точно. Хорошо видно, что закономерность изменения силы нормальной реакции, рассчитанная по новому алгоритму (график 2, рис. 4), существенно отличается от аналогичной закономерности (график 1, рис. 4), полученной на предыдущем варианте алгоритма. Отличается время удара $T_K$ и время от начала удара до максимума силы ударного взаимодействия $T_{Nmax}$ (рис. 4). Может существенно изменяться и величина $N_{max}$. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет более качественно решать вопросы адаптации упруго-вязко-пластичной модели к реальным процессам ударного взаимодействия тел с учетом их механических свойств.

**Заключение.** В результате исследований был создан более совершенный алгоритм и разработана новая компьютерная программа для исследования ударного процесса с помощью упруго-вязко-пластичной модели с регулируемым упруго-пластическим преобразованием. Представлены дифференциальные уравнения движения модели. Рассмотрены условия преобразования модели при переходе от упругих к пластическим деформациям, от этапа нагружения модели к этапу разгрузки при ударном взаимодействии с поверхностью. Подробно рассмотрена методика функционирования модели, составлен алгоритм работы модели, подробно описана логика его функционирования.

[4] Удар упруго-вязко-пластичной модели с регулируемым упруго-пластическим преобразованием: св-во о рег. прогр. для ЭВМ. В. Л. Лапшин, Е. В. Зеньков. № 2019618137; дата регистрации 26.06.2019 г.

Преимуществом нового алгоритма является то, что он позволяет более точно описать процесс в момент начала образования пластических деформаций в материале при его нагружении. Момент начала пластических деформаций на модели может быть точно задан и полностью соответствовать фактическому поведению материала. Для этого, например, можно использовать данные экспериментальных исследований ударного процесса. В предыдущих версиях алгоритма и программы такая возможность отсутствовала.

Так, например, для исследования ударного процесса взаимодействия сферического тела с поверхностью был разработан алгоритм адаптации упруго-вязко-пластичной модели к условиям ударного процесса взаимодействия тел[5].

В данном алгоритме было реализовано условие, при котором упругие и пластические деформации возникают одновременно с самого начала ударного взаимодействия. Однако данное упрощение реального процесса ограничивает возможности моделирования, особенно при изучении влияния пластичности материала на динамику ударного процесса.

Усовершенствованный алгоритм позволяет реализовать возможности упруго-вязко-пластичной модели в полном объеме. Упруго-пластическое преобразование модели может быть выполнено по заданному плану, что обеспечит более качественную адаптацию модели к реальному ударному процессу. При этом фактические пластические деформации могут быть смоделированы более достоверно.

Таким образом, новый параметр модели $F_{ST}$ (усилие нагружения, соответствующее появлению в материале пластических деформаций), введенный с помощью разработанного алгоритма, расширяет возможности адаптации модели к реальным ударным процессам и повышает точность модели при описании пластических деформаций. Работоспособность алгоритма была подтверждена в ходе проведения исследований ударного процесса с помощью модели [18].

Практическое применение разработанной программы может существенно повысить точность и достоверность моделирования ударных процессов. В частности, результаты исследований ударных процессов могут являться базой для совершенствования методик и способов оценки механических свойств конструкционных материалов, основанных на ударном принципе действия. Так, на основе предыдущей версии алгоритма был разработан новый способ определения модуля упругости материала, основанный на ударном взаимодействии тел [16]. Знание механических свойств материалов необходимо при выполнении исследований для формирования математических моделей процессов вибрационного и ударного взаимодействия механических систем. При этом важной задачей является адаптация расчетной модели к реальному ударному процессу, для чего необходима разработка соответствующих способов и методик. Решение данных задач возможно на основе полученных результатов исследований.

**Библиографический список**

1. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. — Ленинград : Политехника, 1990. — 272 с.

2. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев. — Москва : Машиностроение, 1977. — 240 с.

3. Кильчевский, Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. / Н. А. Кильчевский. — Киев : Наукова думка, 1976. — 319 с.

4. Лапшин, В. Л. Исследовательская модель процесса ударного взаимодействия сферического тела с плоской поверхностью рудного материала / В. Л. Лапшин, А. В. Рудых, В. П. Ященко // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2006. — № 2(26). — С. 110–115.

5. Елисеев, С. В. Взаимодействие твердых тел в колебательных системах с упругими связями и сочленениями при действии внешнего вибрационного возмущения / С. В. Елисеев, В. А. Пискунова, А. А. Савченко // Наука и образование. — 2013. — №. 2. — С. 41–49.

6. Станкевич, И. В. Математическое моделирование контактного взаимодействия упругопластических сред / И. В. Станкевич, М. Е. Яковлев, Ту Хтет Си // Наука и образование. — 2012. — № 4. — С. 39–45.

7. Вожжов, А. А. Анализ относительных вынужденных колебаний инструмента и детали при фасонном точении / А. А. Вожжов, М. А. Худаймуратов // Вестник современных технологий. Севастопольский государственный университет. — 2016. — № 3. — С. 16–27.

8. Kuznetsov, N. K. Some problems of control of dynamical conditions of technological vibrating machines / N. K. Kuznetsov, V. L. Lapshin, A. V. Eliseev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Vol. 87. — P. 082027. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082027

[5] Лапшин В. Л. Алгоритм адаптации механореологической модели к условиям и параметрам процесса ударного взаимодействия сферического тела с поверхностью / В. Л. Лапшин, А. В. Глухов // Актуальные вопросы развития науки в мире : сб. трудов IV Междунар. науч. конф. Москва, 2015. Т 1. № 4(4).

9. Петров, И. Б. Моделирование деформационных процессов в сложных конструкциях при их интенсивном динамическом нагружении / И. Б. Петров // Математическое моделирование. — 2006. — Т. 18, — № 5. — С. 91–11.

10. Воронюк, М. Н. Адаптация алгоритмов моделирования динамических процессов фильтрации в перколяционных решетках для графических ускорителей / М. Н. Воронюк, М. В. Якобовский // Математическое моделирование. — 2012. — Т. 24, № 12. — С. 78–85.

11. Beklemysheva, K. A. Numerical simulation of processes in solid deformable media in the presence of dynamic contacts using the grid-characteristic method / K. A. Beklemysheva, I. B. Petrov, A. V. Favorskaya // Math Models Comput. Simul. — 2014. — Vol.6 (3). — P. 294−304. https://doi.org/10.1134/S207004821403003X

12. Численное моделирование динамических процессов при низкоскоростном ударе по композитной стрингерной панели / И. Б. Петров, А. В. Васюков, К. А. Беклемышева [и др.] // Математическое моделирование. — 2014. — Т. 26, № 9. — С. 96–110.

13. Miryaha, V.A. Discontinuous Galerkin method for numerical simulation of dynamic processes in solids / V.A. Miryaha, A.V. Sannikov, I.B. Petrov // Math. Models Comput. Simul. — 2015. — Vol.7 (5). — P. 446–455.

14. Бураго, Н. Г. Континуальная модель и метод расчета динамики неупругой слоистой среды / Н. Г. Бураго, А. Б. Журавлев, И. С. Никитин // Математическое моделирование. — 2018. — Т. 30, № 11. — С. 59–74.

15. Лапшин, В. Л. Упруго-вязко-пластичная механореологическая модель для оценки упруго-вязких свойств минералов при моделировании процессов вибросепарации / В. Л. Лапшин, Е. И. Демаков // Механики XXI века. — 2007. — № 6. — С. 67–71.

16. Лапшин, В. Л. Разработка ударного способа определения модуля упругости материала / В. Л. Лапшин, А. В. Глухов. А. В. Рудых // Системы. Методы. Технологии. — 2015. — № 2(26). — С. 37–43.

17. Lapshin, V. L. Study on the dependence of the force of shock interaction on the body size using a mechanorheological model / V. L. Lapshin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 667. — P. 012055. https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012055

18. Lapshin, V. L. Studies on the dynamics of impact interaction of the mechanoreological model under elastic plastic transformation of its mechanical system / V. L. Lapshin, A. V. Eliseev // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1050. — P. 012040. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1050/1/012040

Поступила в редакцию 22.03.2021
Поступила после рецензирования 05.04.2021
Принята к публикации 12.04.2021

*Об авторах:*

**Лапшин Владимир Леонардович,** профессор кафедры «Механика и сопротивление материалов» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), доктор технических наук, профессор, ScopusID: 57196257405, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2345-2275, lapshin@istu.edu

**Зеньков Евгений Вячеславович,** доцент кафедры «Механика и сопротивление материалов», преподаватель-исследователь ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), доцент кафедры «Управление качеством и инженерная графика» ФГБОУ ВО Иркутского государственного университета путей сообщения, (664074, РФ г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: E-4990-2017, ScopusID: 57056173700, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4414-0307, jovanny1@yandex.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Л. Лапшин — разработка логики и механики функционирования модели, определение целей и задач исследования, разработка алгоритма компьютерного моделирования ударного процесс, формулирование выводов. Е. В. Зеньков — разработка математической модели, разработка нового блока компьютерной программы, написание статьи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
# INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT







УДК 004.42 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-200-206



## Теоретические основы организации ветвлений и повторений в программах на языке логического программирования Пролог

**Д. В. Здор**
ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия» (г. Уссурийск, Российская Федерация)

***Введение.*** Рассматривается организация ветвлений и повторений в контексте логического программирования на примере языка Пролог. Принципиальной особенностью программы на языке логического программирования является то, что компьютер должен решать задачу, проводя рассуждения подобно человеку. Такая программа содержит описание объектов и отношений между ними на языке математической логики. При этом остается актуальной программная реализация ветвлений и повторений в условиях отсутствия в логическом языке специальных операторов для указанных конструкций. Целями работы явились выявление наиболее эффективных способов для решения задач с применением ветвлений и повторений средствами языка логического программирования Пролог, а также демонстрация полученных результатов на примерах вычислительных задач.

***Материалы и методы.*** Выполнен анализ специальной литературы по теме исследования. Использованы методы обобщения, систематизации знаний, тестирования программы, анализ хода ее выполнения.

***Результаты исследования.*** Предложены конструкции организации ветвлений и повторений в программе на языке Пролог. Для организации повторений предложены различные варианты завершения рекурсивного цикла при решении задач.

***Обсуждение и заключения.*** Рассмотрены способы организации ветвлений и повторений на языке логического программирования Пролог. Все эти способы продемонстрированы на примерах решения задач вычислительного характера. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке рекурсивных предикатов в логических языках программирования, а также в учебном процессе при изучении логического программирования на языке Пролог. Приведенные примеры программ позволяют использовать их в качестве технологической основы программирования ветвлений и повторений на языке логического программирования Пролог.

***Ключевые слова:*** логическое программирование, ветвление, повторение предикатов, рекурсивное правило, условие окончания рекурсии.

***Для цитирования:*** Здор, Д. В. Теоретические основы организации ветвлений и повторений в программах на языке логического программирования Пролог / Д. В. Здор // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С.200–206. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-200-206





## Theoretical foundations of the organization of branches and repetitions in programs in the logic programming language Prolog

**D. V. Zdor**
Primorskaya State Academy of Agriculture (Ussuriysk, Russian Federation)

***Introduction.*** The organization of branches and repetitions in the context of logical programming is considered by an example of the Prolog language. The fundamental feature of the program in a logical programming language is the fact that a computer must solve a problem by reasoning like a human. Such a program contains a description of objects and relations between them in the language of mathematical logic. At the same time, the software implementation of

branching and repetition remains a challenge in the absence of special operators for the indicated constructions in the logical language. The objectives of the study are to identify the most effective ways to solve problems using branching and repetition by means of the logic programming language Prolog, as well as to demonstrate the results obtained by examples of computational problems.

***Materials and Methods.*** An analysis of the literature on the subject of the study was carried out. Methods of generalization and systematization of knowledge, of the program testing, and analysis of the program execution were used.

***Results.*** Constructions of branching and repetition organization in a Prolog program are proposed. To organize repetitions, various options for completing a recursive cycle when solving problems are given.

***Discussion and Conclusions.*** The methods of organizing branches and repetitions in the logic programming language Prolog are considered. All these methods are illustrated by examples of solving computational problems. The results obtained can be used in the further development of the recursive predicates in logical programming languages, as well as in the educational process when studying logical programming in the Prolog language. The examples of programs given in the paper provide using them as a technological basis for programming branches and repetitions in the logic programming language Prolog.

***Keywords:*** logical programming, branching, repetition of predicates, recursive rule, recursion termination condition.

***For citation:*** D. V. Zdor. Theoretical foundations of the organization of branches and repetitions in programs in the logic programming language Prolog. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 200–206. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-200-206

**Введение.** Языки логического программирования применяются в качестве инструментария решения задач в области построения систем искусственного интеллекта [1]. Одним из языков непроцедурного логического программирования является Пролог. Программа на этом языке использует теорию исчисления предикатов, представляет собой последовательность фактов и правил, с помощью которых описываются объекты и задаются отношения между ними. Затем формулируется цель, являющаяся утверждением, которое должно быть доказано в ходе выполнения программы. Механизм выполнения программы основывается на осуществлении попытки доказательства цели на основе фактов и правил программы с помощью стандартного механизма сопоставления и поиска с возвратом [2].

Указанные обстоятельства в значительной степени влияют на подход, применяемый при составлении программы. В традиционном процедурном программировании в основе построения программы лежит алгоритм решения задачи. Процедурные языки позволяют программно реализовать составленный алгоритм с помощью операторов. При этом структурные процедурные языки программирования позволяют реализовать базовые алгоритмические структуры. Объектно-ориентированное программирование является эволюционным продолжением развития такой технологии. В основе программы лежит объект, его свойства, методы и события. Однако следует заметить, что обработчик события, представляющий собой процедуру, выполняемую при наступлении события в объектно-ориентированных языках программирования, также содержит последовательность операторов, решающих определенную задачу. Здесь же, на языке логического программирования Пролог, необходимо описать задачу и задать правила ее решения на языке математической логики с учетом особенностей механизма выполнения программы [3].

Таким образом, составление программы для решения простой вычислительной задачи на языке Пролог потребует освоения особого подхода, связанного со спецификой логического программирования. Несмотря на то, что язык Пролог нашел основное применение в области построения экспертных систем, программная реализация вычислений также является актуальной задачей, поскольку вычислительные задачи входят в качестве элементов систем обработки информации, в том числе интеллектуальных [4].

Различным аспектам программирования на языке Пролог посвящен ряд работ. В работе Адама Лалли и Пола Фодора описываются правила сопоставления с образцами на языке программирования Пролог. В частности, авторы предлагают использовать обратное отслеживание вместо сопоставления с образцом, так как необходимо проверять множество условий при синтаксическом анализе, то есть возникает потребность в таком языке запросов, в котором можно включать или исключать условия в зависимости от некоторого контекста. Язык Пролог признан эффективным решением проблемы сопоставления с образцом, а также проблем поиска в глубину и отслеживания с возвратом. Исследователи считают, что несмотря на свою простоту, язык Пролог очень выразителен и позволяет рекурсивным правилам представлять достижимость в деревьях синтаксического анализа, выполнять и воспринимать операцию отрицания в качестве сбоя для проверки отсутствия условий [5].

Н. И. Цуканова детально рассматривает предметную область использования программирования посредством логических моделей, демонстрирует связь базовых логических понятий предикатов с базовыми

языковыми конструкциями Пролога. В работе подробно рассматриваются основы логического программирования и структура программы, основные алгоритмы, при этом в качестве примера используется язык Visual Prolog 7 [6].

Э. Коста рассматривает Пролог как язык логического программирования, также подробно описывает его основные конструкции, структуру программы, виды предложений на Прологе, особенности выполнения программы [7].

И. Братко рассматривает алгоритмы искусственного интеллекта на языке Пролог. Главная ценность работы заключается в том, что исследователь демонстрирует использование языка Пролог в различных областях искусственного интеллекта, в том числе для выполнения эвристического поиска, программирования в условиях ограничений, машинного обучения и т. д. [8].

Решение логических задач на языке программирования Пролог изучено в работе А. Н. Адаменко. Она имеет принципиальное значение, так как автор рассматривает рекурсию как способ организации повтора предикатов [9].

В работе Тарушкина В. Т., Тарушкина П. В., Тарушкиной Л. Т. и Юркова А. В. рассматривается логика предикатов и языка Пролог, что позволяет сделать ряд ценных теоретических выводов об основах использования программного языка [10].

Солдатова О. П. и Лёзина И. В. рассматривают язык Пролог как элемент логического программирования и аксиоматических систем. Также в работе рассматриваются основные стратегии решения задач, процедурность программы, в частности повторения и рекурсия языка [11].

Майкл А. Ковингтон, Роберто Баньяра, Ричард А. O'киф, Ян Вилемекер и Саймон Прайс рассматривают проблему кодирования на языке Пролог. Работа исследователей содержит рекомендации по разметке кода, соглашениям об именах, документации, правильному использованию функций Пролога, разработке программ, отладке и тестированию. В каждом руководстве представлено его обоснование, а там, где есть спорные моменты, представлены иллюстрации относительных плюсов и минусов каждой альтернативы [12].

Марков В. Н. представляет обзор новых и традиционных инструментов логического программирования, а также разбирает основные парадигмы функционального программирования, которое органически реализовано в версии Visual Prolog 7.5. Также рассмотрены основные способы обработки и дальнейшего представления массивов, ветвлений, повторов, графов [13].

Гупта Г., Понтелли Е., Али К. А. М., Карлссон М., Эрменегильдо М. В. в своей работе представляют всесторонний обзор проблем параллельного выполнении языков логического программирования, а также наиболее актуальных подходов. Основное внимание исследователи уделяют проблемам, возникающим при параллельном выполнении программ Prolog, в частности организации ветвлений и повторений. В статье описываются основные методы параллелизма и параллелизма с общей памятью, а также их комбинаций [14].

Также необходимо отметить работу Половиковой О. Н., Ширяева В. В., Оскорбина Н. М., Смоляковой Л. Л., где анализируются особенности выполнения логических задач на языке Пролог, в частности подход в поиске ответов на базе генерации состояния и процедуры проверки, в ходе которых совершаются повторы и организуются ответвления. В работе представлено решение логической задачи, которое на практике иллюстрирует разработанный исследователями подход [15].

Анализ показал, что в литературных источниках рассмотрено решение задач вычислительного характера, в которых необходимо согласно алгоритму реализовать ветвления либо повторения. Во всех проанализированных работах имеются прямые или косвенные описания организации ветвлений и повторений в Прологе. Однако отсутствуют данные о максимальной рациональности какого-либо подхода, что свидетельствует о неполноте знаний по применению языка и его возможностях при составлении программ в контексте логического программирования.

Цель данного исследования заключается в определении наиболее рациональной теоретической основы организации ветвлений и повторений в программах на языке логического программирования Пролог.

**Материалы и методы.** Выполнен анализ специализированной литературы по теме исследования за последние 15 лет. Использовались методы сравнительного анализа, обобщения и систематизации знаний, тестирования программы, анализа хода выполнения программы.

**Результаты исследования.** На основе анализа литературных источников определён наиболее рациональный метод организации ветвлений и повторений в программах на языке логического программирования Пролог. Сформулирована теоретическая основа организации ветвлений и повторений в программах на этом языке. Необходимо отметить, что процесс доказательства цели программы сводится к сопоставлению утверждений, входящих в цель, с фактами и правилами из базы знаний программы. Истинность

утверждений, входящих в цель, устанавливается в порядке их следования в цели слева направо. При этом сопоставление с предикатами базы знаний программы осуществляется в порядке их следования сверху вниз. Если на каком-то шаге выполнения программы, т. е. доказательства решения задачи, сопоставление какого-то предиката терпит неуспех, система Пролог использует второй процесс — поиск с возвратом.

Для управления поиском решения в Прологе имеется ряд стандартных предикатов, позволяющих изменять стандартный механизм поиска. К таким предикатам относится предикат fail, имеющий значение «ложь», и предикат отсечения возвратов, его можно записать как знак «!».

При организации ветвления необходимо составить его конструкцию. В качестве хвостовых предикатов в правилах, составляющих конструкцию ветвления, необходимо включить взаимоисключающие условия. Рассмотрим пример нахождения наибольшего из двух чисел. Известно, что максимум из 2-х чисел в математике можно определить следующим образом:

$$\max(x, y) = \begin{cases} x, & x \geq y \\ y, & x < y \end{cases}.$$

На Прологе нахождение max (x, y) можно задать так:

***predicates***
max (***real, real, real)*** /* 3-хместныйпредикат */
***clauses,***
max (X, Y, X) :- X > =Y.
max (X, Y, Y) :- X<Y.

База знаний не содержит фактов, а содержит два правила. Первое правило можно прочитать так: «Максимальным из значений X, У является X, если X > = Y», второе правило: «Максимальным из значений X, У является У, если X < Y».

Если задать внешнюю цель:
***goal***
max (15, 10, Max).    /* X =15, У =10 */
пролог найдет решение:
Max = 15
1 solutions.

При нахождении решения Прологу потребовалось только первое правило, т. к. при заданных значениях X > У. Так как цель внешняя, Пролог проверит и второе правило на предмет нахождения другого решения и потратит на это время. Условия в правилах взаимоисключающие, поэтому, если добавить предикат отсечения:

```
max (X, Y, X) :- X > =Y, !.   или        max (X, Y, Y) :- X <Y, !.
max (X, Y, Y) :- X <Y.                    max (X, Y, X) :- X > =Y.
```

Пролог, найдя максимальное значение по первому правилу, уже не будет проверять второе. В данном примере наличие предиката отсечения обусловлено логикой программы.

Рассмотрим способы организации повторений в программе на языке Пролог. Для организации повтора действий необходимо задать циклическую конструкцию:

***repeat.***
***repeat:- repeat.***

Такая конструкция задает бесконечный цикл. В качестве предиката цикла можно использовать предикат с любым именем. Предикат ***repeat*** в данном случае не является стандартным и должен быть описан в разделе ***predicates***. В программе необходимо предусмотреть выход из циклической конструкции.

Рассмотрим в качестве примера программу нахождения значений функции $y = x^2$ для аргументов, которые пользователь вводит последовательно с клавиатуры:

***predicates***
tab
repeat
test(real)
***clauses***
repeat.
repeat:-repeat.
tab:-repeat, readreal(X), test(X).
test(10e10):-nl.
test(X):-Y=X*X, write("X=",X," Y=",Y), nl, fail.
***goal***tab.

Если с клавиатуры вводить числа, то на экране будет осуществляться вывод значений аргумента, а рядом — вычисленное значение функции. Выполнение программы завершится, если будет введено число в экспоненциальной форме 10e10. До тех пор, пока не будет введено указанное число, хвостовой предикат test(X) будет иметь значение «ложь» из-за наличия предиката ***fail*** в хвосте правила test(X). В этом случае Пролог использует механизм поиска с возвратом, а предикат ***repeat*** зацикливает процесс на ввод нового числа. Если ввести число в экспоненциальной форме 10e10, цель будет доказана.

В данном примере организация повторений реализована через конструкцию с использованием правила ***repeat:- repeat***, которая, по сути, является рекурсивной, так как и в голове, и в теле имеется предикат с одинаковым именем.

Теперь рассмотрим организацию повторений непосредственно с помощью рекурсивного правила на примере задачи табулирования функции $y = x^2$ на отрезке $\left[a;b\right]$ с шагом $h$:

```
predicates
tab(real,real,real)
clauses
tab(A,B,H):-A<=B, X=A, Y=X*X, write("X=",X," Y=",Y),nl,
        A1=A+H, B1=B, H1=H, tab(A1,B1,H1).
goal
write("a="), readreal(A), write("b="), readreal(B),
write("h="), readreal(H), nl, tab(A,B,H).
```

При исполнении программы на экран будет выведена таблица значений функции на заданном пользователем отрезке с заданным шагом.

Данная программа содержит рекурсивное правило tab(A,B,H). Для выхода из рекурсии в программе использовано хвостовое условие A<=B. Недостатком данного способа выхода из рекурсии является то обстоятельство, что предикат цели tab(A,B,H) после выполнения программы будет иметь значение «ложь» из-за хвостового условия A<=B в теле рекурсивного правила tab(A,B,H) после достижения переменной A значения, превосходящего значение переменной B.

Этот недостаток можно исправить, добавив в программу нерекурсивное правило с тем же именем, что и рекурсивное. Программа примет следующий вид:

```
predicates
tab(real,real,real)
clauses
tab(A,B,_):-A>B.
tab(A,B,H):-A<=B, X=A, Y=X*X, write("X=",X," Y=",Y),nl,
        A1=A+H, B1=B, H1=H, tab(A1,B1,H1).
goal
write("a="), readreal(A), write("b="), readreal(B),
write("h="), readreal(H), nl, tab(A,B,H).
```

Отметим, что в этом случае в рекурсивном правиле, отвечающем за повторения предикатов, и в нерекурсивном, отвечающем за корректный выход из рекурсии, используются взаимоисключающие условия.

Приведем еще один пример организации повторения с помощью рекурсивного правила. Рассмотрим программу вычисления суммы k первых членов ряда $S = 1 + x + x^2 + x^3 + \ldots + x^n + \ldots$:

```
domains
k=integer
x=real
n=real
s=real
predicates
sum(x,k,n,s)
clauses
sum(_,1,N,S):-N=1, S=N.
sum(X,K,N,S):-K1=K-1, sum(X,K1,N1,S1), N=N1*X, S=S1+N.
goal
write("X="), readreal(X),
write("K="), readint(K),
sum(X,K,N,S), nl,
```

write("S=",S).

В этой программе k — количество членов ряда, сумму которых необходимо вычислить. Переменная n необходима для нахождения $i$ -го члена ряда, в этой переменной находится искомая сумма.

При попытке доказательства утверждения цели sum(X,K,N,S) будет выполнятся рекурсивное правило sum(X,K,N,S), при условии, что $K \neq 1$, в качестве хвостового условия которого содержится рекурсивный вызов sum(X,K1,N1,S1), при этом значение переменной $K1 = K - 1$. Так, значение переменной k будет уменьшаться до 1 при прямом ходе рекурсии. После сопоставления с правилом sum(_,1,N,S):-N=1, S=N начнется обратный ход рекурсии, на каждом витке которого будет вычисляться следующий член ряда путем умножения предыдущего члена на значение аргумента x. Значение суммы ряда будет накапливаться в переменной s.

Итак, организация повторений в программе на Прологе реализуется с помощью рекурсии. Рекурсивное правило задает бесконечный цикл. Этот цикл применяется в целях решения вычислительной задачи. При этом завершение цикла и выход из рекурсии может быть реализован разными способами:

— ввод пользователем с клавиатуры заранее предусмотренного значения переменной;

— использование логического выражения в качестве одного из условий рекурсивного правила;

— использование нерекурсивного правила с тем же именем, что и рекурсивное, но в качестве предикатов тела в этом правиле должны выступать истинные утверждения.

**Обсуждение и заключения.** Представлены наиболее эффективные способы организации ветвлений и повторений на языке логического программирования Пролог, выявленные в результате сравнительного анализа литературных источников. Приведенные задачи имеют учебно-тренировочное назначение. Их решение способствует пониманию теории логического программирования на основе применения аналогии с учетом специфики построения программы на языке Пролог и особого механизма ее выполнения.

Приведенные примеры программ позволяют использовать их в качестве технологической основы программирования ветвлений и повторений на языке логического программирования Пролог. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшей разработке использования рекурсивных предикатов в логических языках программирования, а также в учебном процессе при изучении логического программирования на языке Пролог.

**Библиографический список**


1. Genesys-Pro: Innovations in Test Program Generation for Functional Processor Verification / E. Adir, L. Almog, E. Fournier [et al.] // IEEE Design & Test of Computers. — 2014. — Vol. 21 (2). — P. 84–93. https://doi.org/10.1109/MDT.2004.1277900

2. ARM Architecture Reference Manual. ARM DDI 0487A.f. ARM Corporation, 2015. — 5886 p.

3. Kent D. Lee. Foundations of Programming Languages / Kent D. Lee // Springer, 2017. — 370 p.

4. Ute Schmid. Inductive Synthesis of Functional Programs: Universal Planning, Folding of Finite Programs, and Schema Abstraction by Analogical Reasoning / Ute Schmid // Springer Science & Business Media, 2013.

5. Adam Lally. Natural Language Processing with Prolog in the IBM Watson System / Adam Lally, Paul Fodor // Association for Logic Programming, 2011.

6. Цуканова, Н. И. Теория и практика логического программирования на языке Visual Prolog 7 / Н. И. Цуканова, Т. А. Дмитриева. — Москва : Горячая линия – Телеком, 2013. — 232 с.

7. Eduardo Costa. Visual Prolog 7.3 for Tyros / Eduardo Costa // 2010. — 270 p. — URL: http://visual-prolog.com/download/73/books/tyros/tyros73.pdf

8. Братко, И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке Prolog / И. Братко ; [пер. с англ. К. А. Птицина]. — 3-е изд. — Москва : Вильямс, 2004. — 637 с.

9. Адаменко, А. Н. Логическое программирование и Visual Prolog / А. Н. Адаменко, А. М. Кучуков. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2003. — 982 с.

10. Логика предикатов и язык Пролог / В. Т. Тарушкин, П. В. Тарушкин, Л. Т. Тарушкина, А. В. Юрков // Современные наукоемкие технологии. — 2010. — № 4. — С. 62–63.

11. Солдатова, О. П. Программирование на языке ПРОЛОГ / О. П. Солдатова, И. В. Лёзина. — Самара : Репозитарий Самарского государственного аэрокосмического университета : [сайт]. — 2008. — 52 с.

12. Coding guidelines for Prolog / Michael A. Covington, Roberto Bagnara, Richard A. O'Keefe [et al.] // Theory and Practice of Logic Programming. — 2011. — Vol. 12 (6). — P. 889–927.

13. Марков, В. Н. Современное логическое программирование на языке Visual Prolog 7/5 / В. Н. Марков. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2016. — 541 с.

14. Parallel Execution of Prolog Programs: a Survey / G. Gupta, E. Pontelli, K.A.M. Ali [et al.] // ACM Transactions on Programming Languages and Systems. — 2011. — Vol. 23 (4). — P. 472.

15. Особенности программной реализации логических задач на языке PROLOG / О. Н. Половикова, В. В. Ширяев, Н. М. Оскорбин, Л. Л. Смолякова // Известия Алтайского государственного университета. — 2021. — № 1 (117). — С. 166–120.

Поступила в редакцию 01.04.2021
Поступила после рецензирования 14.04.2021
Принята к публикации 04.06.2021

*Об авторе:*

***Здор Дмитрий Валерьевич,*** доцент инженерно-технологического института, ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия» (692500, РФ, Приморский край, г. Уссурийск, пр. Блюхера, 4), кандидат педагогических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1131-6708, jevgeniya.999.gn@mail.ru

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
# INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



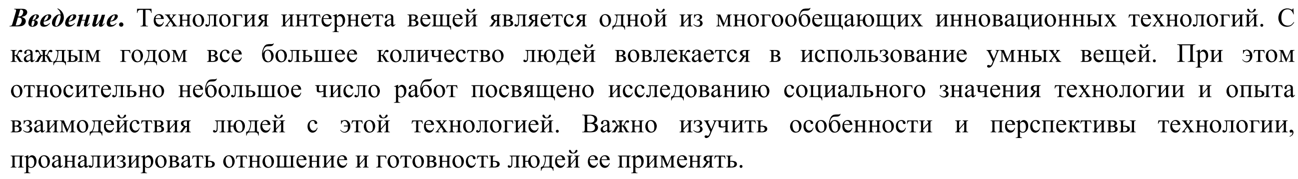




УДК 004.94 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217

## Перспективы технологии интернета вещей

**М. В. Ядровская[1], М. В. Поркшеян[1], А. А. Синельников[2]**
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ВАВТ Минэкономразвития России (г. Москва, Российская Федерация)


***Введение.*** Технология интернета вещей является одной из многообещающих инновационных технологий. С каждым годом все большее количество людей вовлекается в использование умных вещей. При этом относительно небольшое число работ посвящено исследованию социального значения технологии и опыта взаимодействия людей с этой технологией. Важно изучить особенности и перспективы технологии, проанализировать отношение и готовность людей ее применять.

***Материалы и методы***. Проведен интернет-опрос, особое внимание в котором было уделено месту интернета вещей в жизни современного человека, его отношению к концепции устройств. Полученные данные обработаны и систематизированы.

***Результаты исследования.*** Анализ результатов опроса позволил сделать выводы относительно готовности молодых людей применять эту технологию. В ходе проведенного исследования раскрыто содержание понятия интернета вещей, описаны необходимые условия для существования и функционирования технологии, обобщены преимущества технологии интернета вещей, выделены взаимодействующие с этой технологией информационные технологии, перечислены задачи, которые требуют решения для успешного и эффективного внедрения IoT в российскую действительность.

***Обсуждение и заключения.*** Интернет вещей является технологией, которая при последовательном и системном решении ряда задач может стать значимым фактором развития как отдельных сфер жизни и деятельности, так и страны в целом. При этом важно изучать и учитывать социальное влияние распространения технологии. Это позволит увеличить доверие к IoT и устранить отрицательные воздействия. Как показывает опрос, молодежь стремится больше использовать умные вещи. Необходимо расширять круг умных вещей, увереннее вводить в образовательные программы основы практического применения технологии интернета вещей, широко обсуждать в средствах массовой информации проблемы, пути их решения и пилотные проекты, связанные с этой технологией. Благодаря этому можно подготовить не только практически заинтересованных в IoT людей, но и квалифицированные кадры, способные решать задачи по-новому.

***Ключевые слова:*** умные вещи, сети, инновационные технологии, IoT, технологии интернета вещей, интернет-опрос.

***Для цитирования:*** Ядровская, М. В. Перспективы технологии интернета вещей / М. В. Ядровская, М. В. Поркшеян, А. А. Синельников // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 207–217 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217






## Prospects of IoT technology

**M. V. Yadrovskaya[1], M. V. Porksheyan[1], A. A. Sinelnikov[2]**
[1]Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2]Russian Foreign Trade Academy (Moscow, Russian Federation)

***Introduction.*** Internet of Things (IoT) is one of the promising innovative technologies. Every year more and more people are involved in the use of smart things. At the same time, a relatively small number of papers are devoted to the



study of the social value of technology and the experience of human interaction with this technology. It is important to study the features and prospects of the technology, to analyze the attitude and willingness of people to use it.
***Materials and Methods.*** We have conducted an Internet survey, in which special attention is paid to the place of IoT in the life of modern people, their attitude to the concept of devices. The obtained data is processed and systematized.
***Results.*** The analysis of the survey results allowed us to draw conclusions regarding the attitude and willingness of young people to apply this technology. In the course of the study, the IoT concept was defined, the conditions required for the existence and functioning of the technology were described, the advantages of IoT technology were generalized, information technologies interacting with this technology were specified, the tasks that require solutions for the successful and effective implementation of IoT into Russian reality were listed.
***Discussion and Conclusions.*** The Internet of Things is a technology that, with a consistent and systematic solution to a number of problems, can become a significant factor in the development of both individual spheres of life and activity, and the country as a whole. At the same time, it is important to study and consider the social impact of technology dissemination. This will increase trust in the IoT and eliminate negative impacts. The survey shows that young people tend to use smart things more widely. It is necessary to expand the range of smart things, to more confidently introduce the basics of practical application of IoT technology into educational programs, to discuss issues, ways to solve the tasks and pilot projects related to this technology widely in the media. This will enable to train not only people who are practically interested in IoT, but also qualified personnel who are able to solve problems in a new way.

***Keywords:*** smart things, networks, innovative technology, IoT, Internet of things technology, online survey.

***For citation:*** M.V. Yadrovskaya, M.V. Porksheyan, A.A. Sinelnikov. Prospects of IoT technology. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 207–217. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217

**Введение.** Интернет вещей (IoT) — относительно новое понятие и мультидисциплинарное направление деятельности, революционная технология, состоящая в объединении с помощью сетей людей, устройств, физических и виртуальных вещей, процессов и систем, которые могут взаимодействовать друг с другом посредством передачи данных. Самый простой пример — управление посредством приложения на телефоне и сети такими вещами, как кофеварка, стиральная машина, кондиционер, выключатели света в помещении и др. Осуществление такого взаимодействия возможно благодаря специальным средствам идентификации и измерения характеристик вещей, технологиям связи, передающим данные в хранилище, а также информационным технологиям, позволяющим выполнять информационные процессы хранения, обработки, анализа, представления и передачи данных к вещам.

К средствам идентификации вещей, которые не подключены к сети интернет, относят радиочастотные метки, оптически распознаваемые идентификаторы — штрих коды, Data Matrix, QR-коды, инфракрасные метки и средства определения местонахождения в режиме реального времени. К средствам идентификации объектов, которые подключены к интернет-сети, относят MAC-адрес сетевого адаптера, позволяющий идентифицировать устройство на канальном уровне. К средствам измерения параметров объектов относят датчики, интеллектуальные счетчики, интегрированные системы. К средствам передачи данных относят беспроводные и проводные сети. К средствам обработки данных — специальные приложения, информационные и вычислительные системы.

Для реализации проектов умных вещей требуется техническая платформа — средство, которое будет управлять вещами и следить за их состоянием. Платформа для удаленного мониторинга и управления устройствами, имеющими подключение к интернету, может быть выполнена, например, в виде веб-сервера, написанного на языке Java, прототип которой получил название IOPT (Internet Of Pretty Things) [1]. Платформы могут иметь свободный доступ или быть коммерческими. Например, Intel® IoT Platform — платформа для интернета вещей в области автомобильной промышленности, энергетики, здравоохранения, промышленных систем, розничной торговли, умных зданий и домов; платформа SAP HANA Cloud Platform for the Internet of Things предназначена для транспортной отрасли, энергетики, строительства, медицинских систем, розничной торговли, телекоммуникаций, обслуживания нефтепромыслов, металлургии, управления автопарком и управления активами [2].

Взаимодействие умных вещей с пользователем осуществляется через интерфейс, который может быть выполнен в виде информационной панели сервиса, мобильного или WEB приложения.

Устройства интернета вещей — это элементы оборудования, которые обладают обязательными возможностями связи и дополнительными возможностями измерения, срабатывания, а также ввода, хранения и

обработки данных. Устройство, как правило, включает датчик, радиомодуль, микроконтроллер, актуатор, источник питания. Датчики — чувствительные элементы, которые взаимодействуя с системой, постоянно измеряют физические параметры объектов системы в режиме реального времени и формируют сигнал. Их объединяют в узлы и оснащают микроконтроллерами. Микроконтроллер — простейший компьютер, который получая сигнал от датчика, реализует логику работы всего устройства. Микроконтроллеры считывают информацию и, согласно алгоритмам заложенным в них, отправляют информацию на сервер. Например, датчик может формировать сигнал о показании раз в секунду, а микроконтроллер будет принимать решение, нужно ли передавать данные на сервер и с каким промежутком времени это делать. Актуатор является исполнительным устройством, которое осуществляет переключение устройства по сигналу от микроконтроллера или по дистанционной команде, которую может принять радиомодуль. Если задача интернета вещей состоит только в мониторинге системы, то актуатор не требуется. И, наоборот, когда осуществляются задачи сверки, то не нужны датчики в устройствах интернета вещей.

Для взаимодействия всех этих элементов и выполнения ими поставленных задач используются специальные прикладные протоколы. Ввиду различных способов организации взаимодействия интернета вещей и разнообразной элементной базы, существует множество протоколов. «Вопросами стандартизации и практического внедрения этих протоколов занимаются международные организации (ITU-T, IEEE, ETSI, OASIS), неправительственные ассоциации (oneM2M), альянсы производителей и операторов (IERC, ISO/IEC), партнерские проекты» [3, 4].

Применение интернета вещей может создать ряд преимуществ. Действительно, датчики света позволят экономить электроэнергию; датчики дыма — бороться с курением в общественных местах; можно будет обоснованно управлять температурой в помещении с помощью легко управляемых кондиционеров и батарей; радиометки на автомобилях позволят контролировать грузоперевозки; система видеонаблюдения оптимизирует деятельность по выявлению посторонних и лиц, опоздавших на работу; медицинские датчики позволят измерять пульс, давление и другие характеристики состояния, что упростит постановку диагноза и повысит эффективность лечения; в торговой сфере своевременное получение информации о предпочтениях покупателя позволит компании подстроиться под его потребности и нужды; в тех отраслях, где используется дорогостоящее оборудование, скоропортящаяся продукция и возникают финансовые или другие риски, анализ актуальной информации от датчиков IoT позволит снизить риски. Таким образом, использование интернета вещей во многих отраслях позволит своевременно в режиме реального времени получать исчерпывающую информацию, анализ которой сможет повлиять на качество работы в целях ее оптимизации.

Установлено, что американский континент в настоящее время вносит больший вклад в проекты здравоохранения и умных цепочек поставок, а европейский — в проекты умных городов [5]. Также известно, что большую долю рынка сегодня имеют IoT-проекты, связанные с промышленностью и интеллектуальными транспортными средствами, а также с умным городом и умной энергетикой [5].

При детальном рассмотрении IoT появляются вопросы, требующие изучения и научного анализа. Прежде всего, функционирование IoT сопряжено с формированием больших объемов информации, которые из-за огромного потокового поступления называют «большими данными». Существует проблема ограниченной вычислительной способности, которая необходима для обработки и анализа больших данных на выделенных серверах. Решение этой проблемы заключается в переходе к облачным и туманным/пограничным вычислениям, которые поддерживают такую обработку, мониторинг и анализ в системах IoT [5].

Оперирование данными требует технологий их хорошей защиты от несанкционированного доступа, кибератак, рисков и уязвимостей. По словам экспертов, недостаточная авторизация и аутентификация, небезопасное программное, микропрограммное обеспечение и веб-интерфейс, плохое шифрование транспортного уровня являются важными вопросами доверия к технологии IoT [5]. Криптографическая защита информации для мобильных устройств является важным шагом к пониманию защиты данных интернета вещей. Ключевая цель безопасности в облачном приложении IoT — обеспечить, чтобы неавторизованные пользователи не имели доступа к конфиденциальным частным данным, поступающим с устройств. Приложение также должно предотвращать отправку несанкционированных команд на устройства [6]. Должны быть приняты подходы к защите данных через разработку дизайна [7] и формирование специальных оптимальных контейнеров для защиты IoT-устройств, которые могут быть распечатаны на 3D-принтерах [8].

К другим проблемам можно отнести: отсутствие единых подходов и концепций IoT, наличие разных способов подключения вещей к сети, недостаток компонентов микроэлектроники, высокая цена умных устройств и систем, отсутствие единых стандартов на производство оборудования и протоколы передачи данных, незрелость аппаратного и программного обеспечения, высокое энергопотребление систем IoT и др. Соответственно требует решения проблема интероперабельности, которая возникает из-за гетерогенной природы различных технологий и решений, используемых для разработки интернета вещей. Такие решения необходимы на четырех уровнях — техническом, семантическом, синтаксическом и организационном. Они могут быть основаны на адаптерах/шлюзах, виртуальных сетях/наложении [5]. Нуждается в исследованиях задача разработки высококачественных материалов с целью создания новых IoT-устройств с более низким энергопотреблением [5].

Сегодня интернет вещей представляет собой набор пока еще слабо связанных между собой сетей, каждая из которых решает свои задачи и работает по разным стандартам, что создает трудности при их объединении в одну сеть. Значительная часть их оборудования конструировалась для специальных целей, поэтому объединить все системы с помощью IoT довольно сложно, требуется время и средства. Трудно вносить изменения, когда производственные приложения, бизнес-процессы, системы взаимодействия с пользователем и данные изолированы и фрагментированы. Но для решения проблем есть основания. К ним относят снижающуюся стоимость вычислительной техники и технологий передачи данных, развитие облачных технологий, увеличивающееся количество умных устройств, наличие сетей. Технологии становятся намного дешевле и проще в использовании, следовательно, препятствий для их внедрения оказывается все меньше. Необходима разработка стандартов: связи, взаимодействия, конфиденциальности и безопасности [2].

**Материалы и методы.** Отраслевая аналитическая компания Gartner подсчитала, что в 2017 году было использовано 8,4 миллиарда подключенных к интернету вещей, что на 31 % больше, чем в 2016 году [9]. С каждым годом все большее количество людей вовлекается в использование умных вещей, таких как мобильные устройства, смартфоны, планшетные компьютеры и переносимые устройства, фитнес-трекеры и умные часы, промышленные машины и транспортные системы, непрерывные мониторы отслеживания уровня глюкозы в крови и цифровые мониторы артериального давления [9]. Поэтому важно проанализировать отношение людей к технологии интернета вещей, их готовность к применению устройств, которые могут видеть, слышать, чувствовать и создавать новые данные. Как отмечают аналитики, только относительно небольшое число исследований изучило жизненный опыт людей, использующих технологии IoT [9].

Для получения ответов на некоторые вопросы, связанные с IoT, был проведен интернет-опрос, в котором приняли участие 102 человека. Охарактеризуем группу респондентов, графически представив данные о них. Основную долю респондентов составляют молодые люди (65 %) (рис. 1). Они будут воплощать концепцию интернета вещей в жизнь и пользоваться ее результатами.

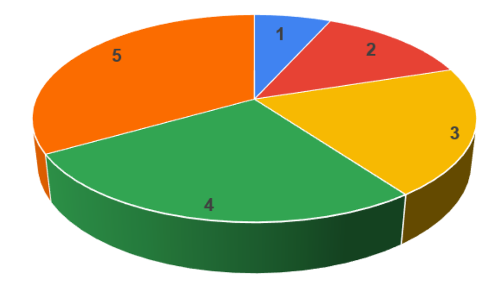



Рис. 1. Соотношение категорий респондентов: 1 — студент; 2 — студент-рабочий; 3 — школьник; 4 — рабочий; 5 — безработный




Рис. 2. Соотношение респондентов по городу проживания: 1 — Ростов-на-Дону; 2 — Санкт-Петербург; 3 — Новочеркасск; 4 — Каменск — Шахтинский; 5 — Владимир; 6 — Глубокий; 7 — Москва; 8 — Киев; 9 — Батайск; 10 — Аксай; 11 — Волгоград; 12-Волгодонск

Большая часть опрошенных (75 человек) — это жители Ростова-на-Дону (рис. 2). Единично в группе представлены жители Москвы, Санкт-Петербурга, Владимира, Волгограда и Киева (рис. 3). Глобальные сети идеально подходят для проведения опросов.

Средний возраст респондентов составляет 20 лет, минимальный возраст — 10 лет, максимальный — 33 года. Средняя заработная плата респондентов — 8 778 рублей, максимальная — 50 000.

Гендерное соотношение респондентов представлено на рис. 4: мужчины (44 %) и женщины (56 %) примерно в равных долях составляют группу опрошенных.

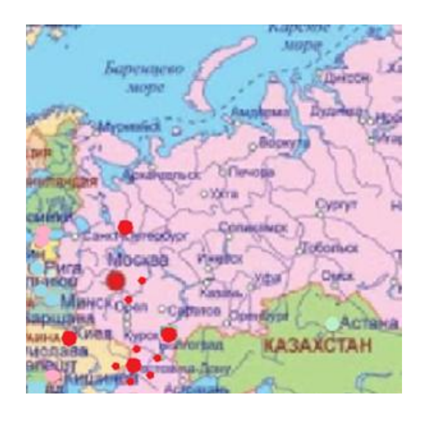



Рис. 3. Красным отмечены города, жители которых приняли участие в опросе

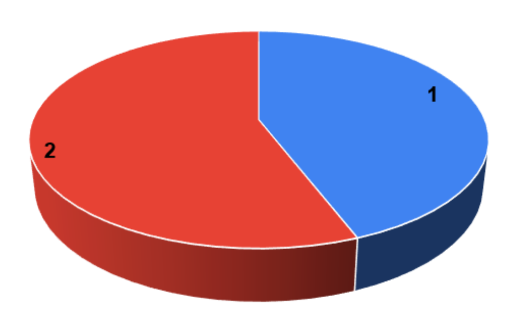
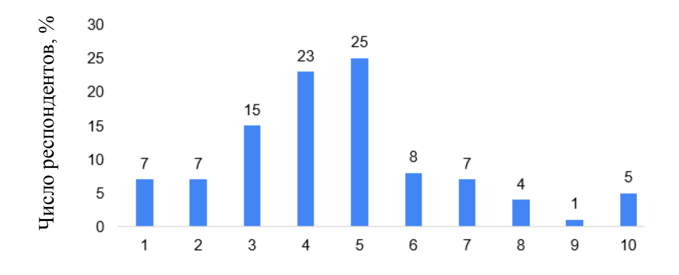



Рис. 4. Гендерное соотношение респондентов: 1 — мужчины; 2 — женщины

Согласно гистограмме, представленной на рис. 5, большинство респондентов средне загружены работой или учебой. Можно предположить, что участники опроса — активные и образованные люди, следящие за развитием технологий. Это подтверждает диаграмма на рис. 6. Около 83 % респондентов высоко оценили уровень своей активности.




Баллы, соответствующие оценке свободного времени

Рис. 5. Соотношение респондентов по наличию свободного времени

Число респондентов, %

2 4 6 5 15 14 16 16 8 16

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Баллы, соответствующие оценке активности

Рис. 6. Соотношение респондентов по уровню активности

Согласно диаграмме, представленной на рис. 7, большая часть опрошенных хорошо владеет компьютером. Действительно, респонденты — молодые люди, которые изучают информационные технологии на всех ступенях обучения и широко применяют их в жизни и деятельности.

Представленные данные позволяют сформировать социальный портрет группы респондентов.

**Результаты опроса.** В процессе статистического анализа данных опроса были получены следующие результаты, касающиеся применения интернета вещей.

На рис. 8 представлено соотношение респондентов по количеству имеющихся в их распоряжении умных вещей. К ним можно отнести: смартфон; умные часы/браслет; умный пылесос; колонку с голосовым помощником; умный холодильник; умную стиральную машину; автомобиль с искусственным интеллектом (автопилот). Как видим, в большинстве случаев в распоряжении опрошенных имеется 2, 3 или 4 умных вещи. Максимальное количество таких вещей — 16.

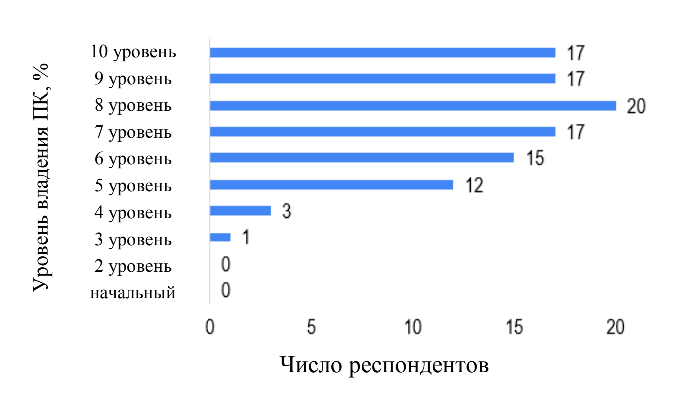



Рис. 7. Соотношение респондентов по уровню владения компьютером

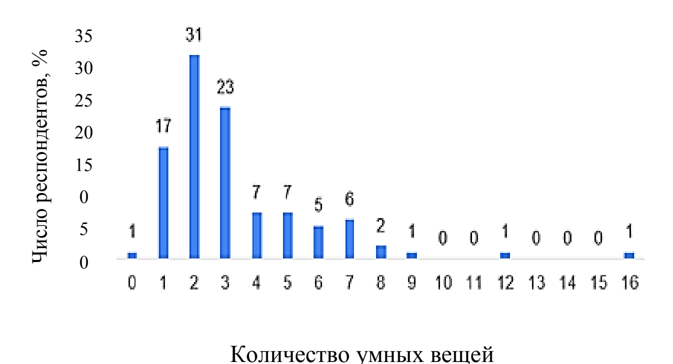



Рис. 8. Соотношение респондентов по количеству имеющихся в их распоряжении умных вещей

Влияние фактора уровня владения персональным компьютером на количество умных вещей, имеющихся в распоряжении респондентов, статистически не доказано (р-значение однофакторного дисперсионного анализа равно 0,73).

Наблюдается слабая корреляционная зависимость между количеством умных вещей и среднемесячным доходом респондентов (0,141). Вероятно, умные вещи, которые отмечаются в опросе, приобретены на доходы всех членов семьи респондентов. При этом наблюдается средняя степень корреляционной связи между возрастом и среднемесячным доходом респондентов (0,52).

Не наблюдается корреляционной зависимости между факторами возраста и количеством умных вещей, которые имеются в распоряжении респондентов
(–0,036). Соответственно в ходе однофакторного дисперсионного анализа не доказано влияние фактора возраста на количество умных вещей, имеющихся в распоряжении респондентов (р-значение однофакторного дисперсионного анализа равно 0,55).

Влияние фактора сферы деятельности, к которой относят себя респонденты, на количество умных вещей, имеющихся в их распоряжении, статистически доказано в ходе однофакторного дисперсионного анализа (р-значение равно 0,03) (рис. 9).

Согласно диаграмме на рис. 10, большинство респондентов считают, что умные вещи можно использовать для работы, обучения, развлечения (29,4 %), для обучения и развлечения (23,5 %) или для обучения (16,7 %). Это говорит о том, что применение интернета вещей еще слабо внедрено в производство, только 8,8 % респондентов применяют умные вещи для работы. Действительно, многие эксперты отмечают такие проблемы распространения интернета вещей в нашей стране, как непонимание результатов от применения IoT, неготовность бизнеса к изменениям, отсутствие реального опыта внедрения и серьезных исследований эффективности инвестиций в интернет вещей.

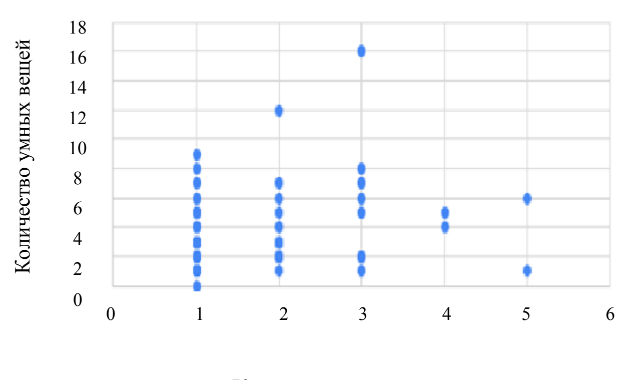



Рис. 9. Диаграмма разброса количества умных вещей, которые имеются у респондентов: 1 — студент; 2 — студент-рабочий; 3 — школьник; 4 — рабочий; 5 — безработный




Рис. 10. Соотношение респондентов согласно характеру использования умных вещей

Объединение умных вещей в сеть позволяет получить систему взаимодействующих между собой и с внешним миром вещей, способную увеличить значимость их использования по отдельности. Согласно ранее проведенным опросам, 30 % респондентов утверждают, что вопрос внедрения интернета вещей в деятельность предприятий является не очень важным или совсем не важным. Наоборот, 34 % считают, что внедрение интернета вещей является очень важным. Согласно проведенному опросу (рис. 11) подавляющее большинство респондентов (94 %) положительно относятся к идее совместного использования умных вещей и превращения их в интернет-вещи.

Большинство респондентов довольно высоко оценивают безопасность данных, получаемых благодаря интернету вещей (микрофон в колонке, GPS в браслете, датчики, измеряющие пульс, температуру и др.) (рис. 12). Такое мнение имеется наряду с тем, что в настоящее время в обществе широко обсуждаются вопросы необходимости повышения безопасности электронных данных. Вероятно, полученные результаты связаны с отсутствием глубокого понимания особенностей функционирования интернета вещей и пока еще малому его практическому применению.




Рис. 11. Соотношение респондентов по мнению о возможности связывания умных вещей

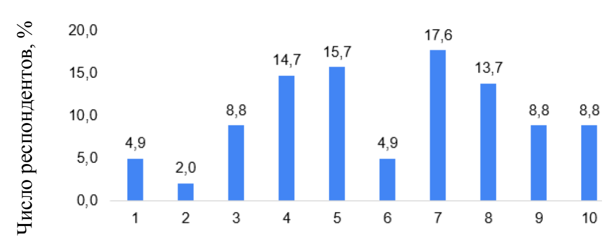



Рис. 12. Соотношение респондентов по мнению об уровне безопасности данных интернета вещей

На сегодняшний день, согласно проведенному опросу, 22,5 % респондентов считают, что в настоящее время крайне слабо обсуждаются проблемы интернета вещей. Наоборот, 53 % опрошенных поставили оценки от 6 до 10 по десятибалльной шкале уровню обсуждения вопросов интернета вещей (рис. 13). Действительно масс-медиа уделяют достаточное внимание новым технологиям умных вещей, приводя примеры практического их применения в различных отраслях деятельности: медицине, обслуживании, обучении, логистике и др.

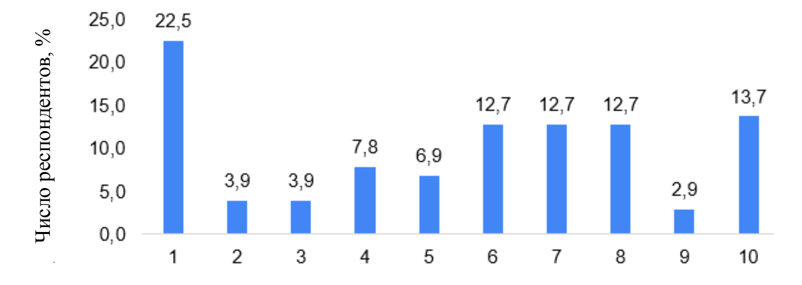



Рис. 13. Соотношение респондентов, согласно мнению о широте обсуждения в обществе проблем интернета вещей

По итогам полученных сведений можно заключить, что:

— в большинстве случаев в распоряжении опрошенных имеется 2, 3 или 4 умных вещи, максимальное количество таких вещей — 16;

— не наблюдается корреляционной зависимости между факторами возраста и количеством умных вещей, которые имеются в распоряжении респондентов;

— наблюдается слабая корреляционная зависимость между количеством умных вещей и среднемесячным доходом респондентов;

— статистически доказано влияние фактора сферы деятельности на количество умных вещей;

— влияние фактора уровня владения персональным компьютером на количество умных вещей, имеющихся в распоряжении респондентов, статистически не доказано;

— количество умных вещей, которыми располагают респонденты, имеет тенденцию возрастать в связи с увеличением обсуждения в обществе технологии интернета вещей;

— респонденты в возрасте от 20 до 30 лет в большей степени применяют умные вещи для работы и развлечения;

— респонденты в возрасте до 20 лет в большей степени используют умные вещи для обучения;

— только 8,8 % респондентов применяют умные вещи для работы;

— респонденты, у которых мало свободного времени, чаще на практике используют умные вещи для работы и обучения;

— респонденты, у которых много свободного времени, чаще применяют умные вещи для развлечения;

— чем в большей степени респондент планирует свою деятельность, тем большим количеством умных вещей он владеет;

— подавляющее большинство респондентов (94 %) положительно относятся к идее совместного использования умных вещей и превращения их в интернет-вещи;

— по мере увеличения уровня владения компьютером, увеличивается значимость связывания умных вещей в сеть;

— чем больше внимания уделяется обсуждению технологии интернета вещей в обществе, тем больше у респондентов появляется надежд на связывание умных вещей между собой;

— 22,5 % респондентов считают, что в настоящее время крайне слабо обсуждаются проблемы интернета вещей;

— 53 % опрошенных поставили оценки от 6 до 10 по десятибалльной шкале уровню обсуждения вопросов интернета вещей;

— большинство респондентов довольно высоко оценивают безопасность данных, получаемых благодаря интернету вещей (микрофон в колонке, GPS в браслете, датчики, измеряющие пульс, температуру и др.).

**Обсуждение результатов.** Согласно распространенному мнению, наиболее эффективным инструментом развития становится технология интернета вещей [10–12]. Она является неотъемлемым атрибутом информационного общества, формой коммуникации людей и вещей. Объединение умных вещей в сеть может характеризоваться различным уровнем сложности и охвата взаимодействия. Эксперты указывают на перспективы «умных» домов, заводов, больниц, городов, сельского хозяйства, перевозок, розничной торговли, среды, планеты и др. [13].

Технология IoT способна серьезно повлиять на производство, характер бизнес-процессов и обычную жизнь человека. Совместное ее использование с другими информационными технологиями (таблица 1) во много раз увеличит темпы и определит инновационные способы желаемых преобразований [14, 15]. Если последовательно и системно решать целый комплекс задач, технология интернета вещей может стать значимым фактором развития России, (таблица 1).

Таблица 1

Характеристика технологии интернета вещей

| **Преимущества IoT** | **Решение проблем IoT в России** | **Технологии, взаимодействующие с IoT** |
|---|---|---|
| Консолидация данных | Государственная поддержка технологии | Автоматическая обработка данных |
| Анализ большого количества данных | Развитие законодательной базы | Технологии Big Data |
| Актуальное получение исчерпывающей информации | Налоговое стимулирование предприятий | Высокопроизводительные сети |
| Мониторинг и прогнозирование состояния | Разработка единой онтологии, кодификаторов, справочников | Распределенные вычисления |
| Автоматизированный контроль качества | Построение технологии открытого технического словаря | Машинное обучение |
| Автоматизация взаимодействия | Развитие собственного производство устройств IoT | Виртуальная реальность VR |
| Дистанционное управление процессами | Формирование и регулирование рынка IoT | Дополненная реальность (AR) |
| Автоматическая диагностика | Разработка стандартов IoT | Робототехника |

| Преимущества IoT | Решение проблем IoT в России | Технологии, взаимодействующие с IoT |
|---|---|---|
| Бесперебойная работа производства | Разработка единых протоколов передачи данных | Облачные технологии |
| Выпуск продукции в автоматическом режиме | Развитие технологий криптографической защиты информации | Видеоанализ |
| Мобильное взаимодействие персонала | Создание единых центров сбора информации IoT | Нейронные сети |
| Повышение качества взаимодействия между различными подразделениями предприятия | Создание отраслевых баз данных для промышленного интернета вещей | Искусственный интеллект |
| Подбор оптимального режима эксплуатации оборудования | Развитие мобильных технологий | Кибербезопасность |
| Снижение рисков и инцидентов | Формирование общественного мнения | Мобильные технологии |
| Оптимизация логистических и производственных цепочек | Формирование реального опыта применения IoT | Компьютерное моделирование |
| Снижение значения человеческого фактора на производстве | Исследований эффективности инвестиций в IoT | Производство высокотехнологичных протезов рук |
| Иммерсивное обучение специалистов | Создания сервис-ориентированных бизнес-моделей | Технология цифровых двойников (Digital Twins) |
| Создание полного портрета потребителя | Короткие пилотные проекты | 3D-моделирование |
| Предоставление услуги по мониторингу качества продукции | Разработка высококачественных материалов с более низким энергопотреблением | 3D-сканирование и печать |
| Внедрение в сельское хозяйство (теплицы и др.) | | Виртуальные сим-карты eSIM |
| | | Цифровое рабочее место |
| | | Межмашинное взаимодействие |
| | | Технология аддитивного производства |

При этом важно изучать и учитывать социальное влияние распространения технологии [12]. Достоверные выводы такого изучения позволят увеличить доверие к IoT и устранить отрицательные воздействия, такие как: стирание границ между частным и общественным; возможность того, что алгоритмические процессы принятия решений в IoT будут предвзятыми и усугубят социальное неравенство и социальную маргинализацию; сосредоточение технологий умного города на богатых городах или районах, способных платить за свои услуги; возможность не оправдать ожидания от применения технологии [9, 12, 16] и др.

**Выводы.** Как показывает опрос, молодежь готова практически применять IoT. Молодые люди в возрасте от 20 до 30 лет в большей степени используют умные вещи для обучения и организации досуга, а не только в быту. Школьники используют умные вещи в большей степени для обучения. Это, несомненно, важные направления применения умных вещей. Наиболее значимым было бы применение IoT в производстве и обеспечивающей деятельности, в которых в настоящее время из-за наличия ряда объективных причин применение технологии интернета вещей невысоко. Положительные шаги в направлении применения IoT крайне важны. Необходимо и дальше расширять круг умных вещей, которые могли бы быть использованы в образовательной и развлекательной сферах с целью формирования у молодых людей навыков практического использования этой технологии и превращения ее в разумную потребность. Важно вводить в образовательные программы основы практического применения технологии интернета вещей и параллельно с другими технологиями, которые эффективно работают вместе. Это будет

способствовать, с одной стороны, углублению и расширению знаний инновационных информационных технологий. С другой стороны, позволит заинтересовать молодежь, даст ориентировочную основу для практического применения, дальнейшего развития и внедрения этой технологии в различные сферы деятельности. Также необходимо широко обсуждать в средствах массовой информации проблемы, пути их решения и пилотные проекты, связанные с технологиями интернета вещей. Это позволит подготовить не только практически заинтересованных в IoT людей, но и квалифицированные кадры, способные решать задачи по-новому.

**Библиографический список**

1. Разработка платформы для управления инфраструктурой интернета вещей / А. А. Якименко, А. И. Белов, П. С. Гончарук, И. М. Сгубарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук : [сайт]. — 2017. — Т. 19, № 6. — С. 97–104. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-platformy-dlya-upravleniya-infrastrukturoy-interneta-veschey/viewer (дата обращения : 13.02.2021).

2. Гойхман, В. Аналитический обзор протоколов Интернета вещей / В. Гойхман, А. Савельева // Технологии и средства связи : [сайт]. — 2016. — № 4. — С. 32–37. — URL: http://lib.tssonline.ru/articles2/reviews/analiticheskiy-obzor-protokolov-interneta-veschey (дата обращения : 11.02.2021).

3. Щербинина, М. Ю. Концепция интернет вещей / М. Ю. Щербинина, Н. А. Стефанова // Креативная экономика : [сайт]. — 2016. — Т. 10, № 11. — С. 1323–1336. URL: https://www.researchgate.net/publication/311863315_Koncepcia_internet_vesej (дата обращения : 12.02.2021).

4. Anna Gerber. Connecting all the things in the Internet of Things / Anna Gerber, Jim Romeo // IBM Developer. — 2020. — URL: https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/iot-lp101-connectivity-network-protocols/ (accessed : 30.03.2021).

5. Sachin Kumar. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review / Sachin Kumar, Prayag Tiwari, Mikhail Zymbler // Journal of Big Data. — 2019. — Vol. 6. — 111. URL: https://journalofbigdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40537-019-0268-2 (accessed : 30.03.2021).

6. Joy Patra. Securing IoT applications / Joy Patra, Amitranjan Gantait, Ayan Mukherjee // IBM Developer. — 2018. — URL: https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/iot-trs-secure-iot-solutions3/ (accessed : 30.03.2021).

7. Whitelegg, D. Application privacy by design / Dave Whitelegg // IBM Developer. — 2018. — URL: https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/s-gdpr2/ (accessed: 30.03.2021).

8. Pomerantz, O. 3D Printing for IoT Developers / Ori Pomerantz // IBM Developer. — 2018. — URL: https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/3d-printing-for-iot-developers/ (accessed: 30.03.2021).

9. Lupton, D. The Internet of Things: Social dimensions / Deborah Lupton // Sociology Compass. — 2020. — Vol. 14 (4). — URL: https://www.researchgate.net/publication/-338576609_The_Internet_of_Things_Social_dimensions (accessed: 30.03.2021).

10. Довгаль, В. А. Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета : [сайт]. — 2018. № 1(216). — С. 129–135. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-kontseptsiya-prilozheniya-i-zadachi/viewer (дата обращения : 11.02.2021).

11. Маркеева, А. В. Интернет Вещей. Возможности и угрозы для современных организаций / А. В. Маркеева // Общество: социология, психология, педагогика : [сайт]. — 2016. — № 2. — С. 42–46. — URL : https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-iot-vozmozhnosti-i-ugrozy-dlya-sovremennyh-organizatsiy/viewer (дата обращения : 12.02.2021).

12. Маркеева, А. В. Социальные последствия развития интернета вещей (IoT) / А. В. Маркеева // Современные информационные технологии и ИТ-образовани : [сайт]. — 2016. — Том 12, № 2. — С. 236–240. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialnye-posledstviya-razvitiya-interneta-veschey-iot/viewer (дата обращения : 12.02.2021).

13. Цветков, Ю. Я. Интернет вещей как глобальная инфраструктура для информационного общества / Ю. Я. Цветков // Современные технологии управления : [сайт]. — 2017. — №6 (78). — URL: https://sovman.ru/article/7803/ (дата обращения : 12.02.2021).

14. Gerber, A. Key concepts and skills for getting started in IoT / Anna Gerber, Jim Romeo // IBM Developer. — 2020. — URL: https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/iot-key-concepts-skills-get-started-iot/ (accessed: 30.03.2021).

15. Gerber, A. Choosing the best hardware for your next IoT project / Anna Gerber, Jim Romeo // IBM Developer. — 2020. — URL: https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/iot-lp101-best-hardware-devices-iot-project/ (accessed: 30.03.2021).

16. Городищева, А. Н. Интернет вещей и его место в информационном обществе / А. Н. Городищева, Э. В. Замятина // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. — 2015. — №1. — С. 134–141.

Поступила в редакцию 01.04.2021
Поступила после рецензирования 14.04.2021
Принята к публикации 04.06.2021

*Об авторах:*

**Ядровская Марина Владимировна**, преподаватель кафедры «Медиатехнологии», ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4469-1603, marinayadrovskaia@rambler.ru

**Поркшеян Маркос Витальевич**, программист УЦОТ, ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6772-487X, marinayadrovskaia@rambler.ru

**Синельников Антон Алексеевич**, директор по информатизации ВАВТ Минэкономразвития России (119285, РФ, г. Москва, Воробьёвское ш., 6А), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2522-4900, antal@vavt.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

М. В. Ядровская — формирование основной концепции, определение цели и задач исследования, анализ литературы, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. М. В. Поркшеян — проведение опроса и расчетов, анализ литературы, подготовка текста. А. А. Синельников — подготовка анкеты для опроса, анализ литературы, формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*